

2004-12-01

---

## PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. PRINCIPIOS GENERALES



E: LIGHTNING PROTECTION. GENERAL PRINCIPLES

---

CORRESPONDENCIA:

---

DESCRIPTORES: descarga eléctrica atmosférica.

---

I.C.S.: 91.120.40

---

Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC)  
Apartado 14237 Bogotá, D.C. - Tel. 6078888 - Fax 2221435

---

Prohibida su reproducción

Primera actualización  
Editada 2004-12-13

## PRÓLOGO

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, **ICONTEC**, es el organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993.

**ICONTEC** es una entidad de carácter privado, sin ánimo de lucro, cuya Misión es fundamental para brindar soporte y desarrollo al productor y protección al consumidor. Colabora con el sector gubernamental y apoya al sector privado del país, para lograr ventajas competitivas en los mercados interno y externo.

La representación de todos los sectores involucrados en el proceso de Normalización Técnica está garantizada por los Comités Técnicos y el período de Consulta Pública, este último caracterizado por la participación del público en general.

La NTC 4552 (Primera actualización) fue ratificada por el Consejo Directivo del 2004-12-01.

Esta norma está sujeta a ser actualizada permanentemente con el objeto de que responda en todo momento a las necesidades y exigencias actuales.

A continuación se relacionan las empresas que colaboraron en el estudio de esta norma a través de su participación en el Comité Técnico 147 Protección contra rayos.

ACIEM  
DEMO INGENIERÍA  
ECOPETROL  
EEPPM  
ELECTROPOL - DENH  
ENERGEX  
GENELEC  
ISA  
LEVITON  
POLICIA NACIONAL

REPREC  
SEGURIDAD ELÉCTRICA  
TECNOLOGÍA ALTERNATIVA  
TEP INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA  
UNIVERSIDAD DISTRITAL  
UNIVERSIDAD NACIONAL  
UNIVERSIDAD PILOTO  
UPSISTEMAS

**ICONTEC** cuenta con un Centro de Información que pone a disposición de los interesados normas internacionales, regionales y nacionales.

**DIRECCIÓN DE NORMALIZACIÓN**

## **PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. PRINCIPIOS GENERALES**

### **0. INTRODUCCIÓN**

Esta Norma Técnica Colombiana, ha sido concebida para estar en armonía con las normas nacionales e internacionales que tienen que ver con la protección contra rayos. La norma basa la protección en la aplicación de un Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA) conducente a mitigar los riesgos asociados con la exposición directa e indirecta a los rayos. Se fundamenta en que la instalación de un SIPRA no induce ni previene la formación del rayo.

La NTC 4552 es una norma de carácter general que pretende dar principios físicos aplicables para unas buenas prácticas de ingeniería, con el fin disminuir los efectos de los rayos, que pueden ser de tipo electromagnético, mecánico o térmico. En general, una protección contra rayos totalmente efectiva no es técnica ni económicamente viable, pero si se siguen las recomendaciones de esta norma, la probabilidad de daños será mínima.

El rayo es un fenómeno meteorológico de origen natural, cuyos parámetros son variables espacial y temporalmente. La mayor incidencia de rayos en el mundo, se da en las tres zonas de mayor convección profunda: América tropical, África central y norte de Australia. Colombia, por estar situada en la Zona de confluencia intertropical, presenta una de las mayores actividades de rayos del planeta; de allí la importancia de normalizar la protección contra dicho fenómeno, pues si bien los métodos desarrollados a nivel mundial aplican para Colombia, algunos parámetros del rayo, como densidad de descargas a tierra o nivel cerámico, que son particulares para nuestro país.

Todas las consideraciones para la implementación del SIPRA, tales como las especificaciones, materiales y ubicación, deben ser tenidas en cuenta, preferiblemente, en la etapa de diseño de una estructura a construir. Ello implica un consenso entre los diseñadores, constructores, instaladores y propietarios. Sólo así será más benéfico y menos costoso llegar a conciliar las exigencias técnicas con la parte estética. La implementación del SIPRA parte de la base que los cableados de la instalación a proteger están de acuerdo con lo establecido en la NTC 2050. La presente norma sólo acepta la utilización de los dispositivos y métodos que en ella expresamente se avalan.

**Los componentes principales de esta norma son:**

- Evaluación del nivel de riesgo.
- Definiciones

- Datos estadísticos para obtener los parámetros del rayo.
- Materiales para terminales de captación, bajantes y puestas a tierra.
- Criterios para inspección, cálculos y mantenimiento.
- Aspectos mínimos para dimensionar protecciones internas.

La presente actualización de la NTC 4552 ha tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Revisión de todas las definiciones.
- Reorganización de los temas para que sea más fácil su lectura.
- Explicación del fenómeno del rayo se dejó como anexo.
- Ampliación de lo relacionado con protecciones internas.
- Revisión de la metodología para la evaluación del nivel de riesgo.
- Inclusión de un ejemplo de aplicación de la norma.

Esta norma no tiene la finalidad de ser un manual de especificaciones de diseño, ni un texto de instrucciones para personal no calificado, ni provee el soporte legal para hacer la minuta de un contrato. Es un documento de carácter eminentemente técnico, cuyo cumplimiento se espera que sea exigido por los usuarios interesados en una buena protección contra rayos, como garantía de protección de sus intereses.

## **1. OBJETO**

Esta norma establece la metodología que debe ser utilizada para propender por la seguridad de las personas ubicadas en estructuras de uso común, expuestas a impactos directos o indirectos de rayos.

## **2. ALCANCE**

Esta norma es aplicable al diseño, construcción, inspección y mantenimiento de un sistema integral de protección contra rayos para estructuras de uso común, tales como teatros, centros educativos, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas al aire libre, parques de diversión, aeropuertos, hospitales, prisiones.

Esta norma no es aplicable a sistemas de transmisión, generación ni distribución de energía eléctrica, instalaciones de comunicaciones, medios de transporte ni estructuras que contienen explosivos o químicos.

## **3. DEFINICIONES**

### **3.1**

#### **sistema integral de protección contra rayos - SIPRA**

sistema con el que se puede alcanzar un alto grado de seguridad para las personas y equipos, mediante la combinación de varios elementos como la protección externa, la protección interna, la guía de seguridad personal y el sistema de alarma.

**3.2****sistema de protección externo contra rayos - SPE**

es el conjunto comprendido por terminales de captación, bajantes, puesta a tierra de protección contra rayos, conectores, herrajes y otros, cuya función es captar las descargas y conducir las a tierra en forma segura, ejerciendo un control sobre la descarga.

**3.2.1****terminal de captación o dispositivo de interceptación de rayos (*Air Terminal*)**

elemento metálico cuya función es interceptar los rayos que podrían impactar directamente sobre la instalación a proteger. Comúnmente se conoce como pararrayos.

**3.2.2****anillo equipotencial (*Equipotential Ring*)**

elemento conductor utilizado para interconectar los terminales de captación y/o las bajantes, con el fin de proveer equipotencialidad y distribuir la corriente del rayo.

**3.2.3****conductor bajante (*Down Conductor*)**

elemento conectado eléctricamente entre los terminales de captación o la red de terminales de captación y la puesta a tierra de protección contra rayos – PTPR, cuya función es conducir las corrientes de rayo que pueden incidir sobre la instalación a proteger.

**3.2.4****puesta a tierra de protección contra rayos- PTPR (*Earth Termination*)**

conductor o grupo de ellos inmerso en el suelo, cuya función específica es dispersar y disipar las corrientes del rayo en el suelo. Esta puesta a tierra hace parte del sistema de puesta a tierra general de la edificación.

**3.2.5****electrodo de puesta a tierra (*Earthing Electrodes*)**

conductor o conjunto de conductores enterrados que sirven para establecer una conexión con el suelo y que forma parte de todo el sistema de puesta a tierra.

**3.2.6****resistividad del terreno ( $\rho$ ) (*Resistivity*)**

Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1 m x 1 m x 1 m, medida entre dos caras opuestas. Se da en Ohmio metro ( $\Omega \bullet m$ )

**3.2.7****sistema de puesta a tierra – SPT (*Earthing System – Grounding System*)**

conjunto de elementos conductores de una edificación, sin interrupciones ni fusibles, que se unen con el suelo o terreno.

**3.2.8****barraje equipotencial – BE (*Bonding Bar*)**

conductor en forma de barra, placa o cable que permite la unión de dos o mas conductores y que garantiza el mismo potencial.

**3.2.9****conductor de puesta a tierra para equipos (*Equipment Grounding Conductor*)**

es un conductor usado para conectar partes metálicas que no transportan corriente de equipos, canalizaciones y otros encerramientos con el conductor de servicio puesto a tierra (neutro) o con la fuente del sistema derivado.

**3.2.10****tierra (*Earth – Ground*)**

para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia al suelo, terreno, masa chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término masa sólo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, barcos y carros.

**3.3****sistema de protección interna (*Internal Lightning Protection System*)**

es el conjunto de dispositivos que limitan las sobrecorrientes y sobretensiones transitorias que se pueden presentar al interior de una instalación.

**3.3.1****equipotencializar**

es la acción de Interconectar partes conductoras y/o conductores activos con el sistema de puesta tierra por medio de conductores eléctricos y/o dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias para llevarlas a la mínima diferencia de potencial y así propender por la seguridad.

**3.3.2****transitorio (*Transient*)**

es el cambio en las condiciones de energía de un sistema entre dos estados estables, de corta duración comparado con la escala de tiempo de interés.

**3.3.3****sobretensión (*Voltage Surge*)**

tensión anormal entre dos puntos del sistema eléctrico, que es mayor que el valor máximo presentado entre los mismos dos puntos bajo condiciones de servicio normal.

NOTA      En el contexto de la presente norma, se considera como la sobretensión producida por el rayo, definida como una onda transitoria de tensión que se propaga a lo largo de una línea o circuito y se caracteriza por un rápido incremento seguido por un decrecimiento lento de la tensión, del orden de microsegundos.

**3.3.5****nivel básico de aislamiento al impulso (*Basic Insulation Level - BIL*)**

es la tensión al impulso asignada por los fabricantes a un equipo o a una parte de este, que caracteriza la capacidad específica de su aislamiento para soportar sobretensiones.

**3.3.6****dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias - DPS (*Surge Protective Device*)**

dispositivo destinado a limitar las sobretensiones transitorias, evacuando las corrientes asociadas a dichas sobretensiones. Puede contener uno o mas elementos no lineales. Ejemplos de estos dispositivos son los varistores, diodos de supresión, vías de chispas, tubos de gas, tiristores y triacs.

**3.3.7****máxima tensión de operación continua (*Maximun Continuous Operating Voltage*)**

máxima tensión c.a. o c.c. que puede ser aplicada continuamente a un DPS en cualquier modo de protección. Es igual a la tensión nominal del dispositivo.

**3.3.8****tensión residual (*Residual Voltage*)**

es el valor pico de la tensión que aparece entre los terminales de un DPS debido al paso de una corriente de descarga.

**3.3.9****nivel de protección de tensión (*Voltage Protection Level*)**

parámetro que caracteriza el comportamiento de un dispositivo de protección contra sobretensiones DPS para limitar la tensión a través de sus terminales, debe ser mayor que el valor máximo de la tensión de limitación medida

**3.3.10****categoría de sobretensión (*Overvoltage Category*)**

es un número que define una condición de sobretensión transitoria, soportable por un equipo. Se clasifican en:

- Categoría I: equipo para ser conectado a circuitos ramales en los cuales se toman acciones para limitar las sobretensiones transitorias a un nivel apropiadamente bajo. Ejemplo de tales equipos son los electrónicos.
- Categoría II: equipo para ser conectado a circuitos ramales cuyo consumo de energía es mayor que los de categoría I. Ejemplo de tales equipos son: herramientas portátiles y otros electrodomésticos.
- Categoría III: equipo donde la confiabilidad y la disponibilidad de este, se encuentra sujeto a requerimientos especiales. Ejemplos de tales equipos son aquellos para uso industrial con conexión permanente a la red, motores estacionarios, tableros de distribución secundaria, barrajes, cables,
- Categoría IV: equipo para uso en el origen de la instalación. Ejemplo de tales equipos son: medidores eléctricos, equipos de protección contra sobrecorriente.

**3.3.11****tensión de limitación medida**

máxima magnitud de tensión que es medida entre los terminales de un DPS durante la aplicación de impulsos de forma de onda y amplitud especificada.

**3.3.12****conductor activo**

aquella parte destinada a la transmisión de electricidad y por tanto sometida a un cambio de tensión en su condición de operación normal.

**3.4****rayo (*Lightning*)**

la descarga eléctrica atmosférica o más comúnmente conocida como rayo es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera

**3.4.1****relámpago (*Flash*)**

energía visible producida por el rayo

**3.4.2****trueno (*Thunder*)**

energía audible producida por el rayo.

**3.4.3****nivel ceráunico - NC**

número de días al año en los cuales es oído por lo menos un trueno.

**3.4.4****densidad de descargas a tierra - DDT**

número de descargas individuales (*Strokes*) a tierra por kilómetro cuadrado al año. Medida en área de 9 km<sup>2</sup> (3 km x 3 km). Permite cuantificar la incidencia de rayos en la zona.

**3.4.5****corriente pico absoluta promedio del rayo**

el valor con el 50 % de probabilidad de que sea la corriente máxima del rayo, sin importar la polaridad.

**3.4.6****máxima rata de ascenso de la corriente del rayo - di/dt (*Maximum Current Rate of Rise*)**

variación del valor de corriente durante el tiempo de frente de la onda. Se utiliza para el cálculo de tensiones electromagnéticas inducidas.

**3.4.7****energía específica (*Action Integral*)**

energía disipada por la corriente del rayo en una resistencia unitaria. Es la integral en el tiempo de la corriente del rayo al cuadrado durante la duración del rayo.

**3.5****método electrogeométrico**

procedimiento que permite establecer cual es el volumen de cubrimiento de protección contra rayos (zona de protección) de una estructura para una corriente de diseño (corriente del rayo especificada) según la posición y altura de la estructura interceptora. Este método se utiliza en el diseño de instalaciones de captación de rayos.

**3.5.1****distancia de impacto ( $r_{sc}$ )**

longitud definida por el método electrogeométrico (que es función exponencial de la corriente de retorno del rayo) que determina la posición de la estructura interceptora con respecto a la estructura protegida, o como el radio de una esfera que permite establecer cual es el área de cubrimiento de una estructura para una corriente dada.

**3.6****seguridad (*Safety*)**

condición de estar libre de un riesgo inaceptable

**3.6.1****tensión de contacto –Vc (*Touch Voltage*)**

diferencia de tensión entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender el brazo (véase la Figura 1).

**3.6.2****tensión de paso –Vp (*Step Voltage*)**

diferencia de tensión entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un metro en la dirección del gradiente de tensión máximo. Esta distancia es equivalente a un paso normal promedio (véase la Figura 2).



**3.6.3**

**nivel de riesgo por rayos – NRR (*Risk Lightning*)**

indicador que marca los límites y la proporción dentro de los cuales es necesario utilizar un nivel de protección contra rayos preestablecido.



Figura 1. Tensión de contacto



Figura 2. Tensión de paso

**4.      ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA**

**4.1      ABREVIATURAS**

BE      Barraje Equipotencial

DDT      Densidad de Descargas a Tierra

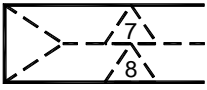









DPS      Dispositivo de Protección contra Sobretensiones transitorias

$I_{abs}$	Corriente pico absoluta promedio del rayo
$di/dt$	Rata de ascenso de la corriente del rayo
RECMA	Red colombiana de medición y localización de rayos
$r_{sc}$	Distancia de impacto o distancia de atracción del rayo
SIPRA	Sistema integral de protección contra rayos
PTPR	Puesta a Tierra de Protección contra Rayos
SPE	Sistema de protección externo
SPI	Sistema de protección interno
$V_c$	Tensión de contacto
$V_p$	Tensión de paso
NC	Nivel Cerámico o ceraunio

## 4.2 SIMBOLOGÍA A UTILIZAR EN PLANOS DESCRIPTIVOS DE SIPRA

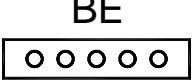
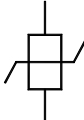




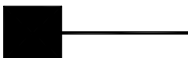
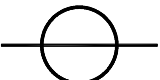



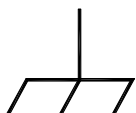

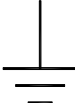

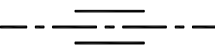

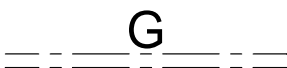
Para facilitar la aplicación de la presente norma, se sugiere la utilización de la siguiente simbología en los planos que deben acompañar todo proyecto.

### SIMBOLOGÍA

	Altura del techo		Conexión de acero de la construcción, canales, etc.
	Antena	<b>ACERO</b>	Construcción en acero
	Áreas con riesgo de explosión		Contorno de la edificación
	Ascensor		Cubierta metálica
	Asta de bandera		Chimenea
	Bajante		Descargador a gas

Continúa...

**SIMBOLOGÍA (Final)**

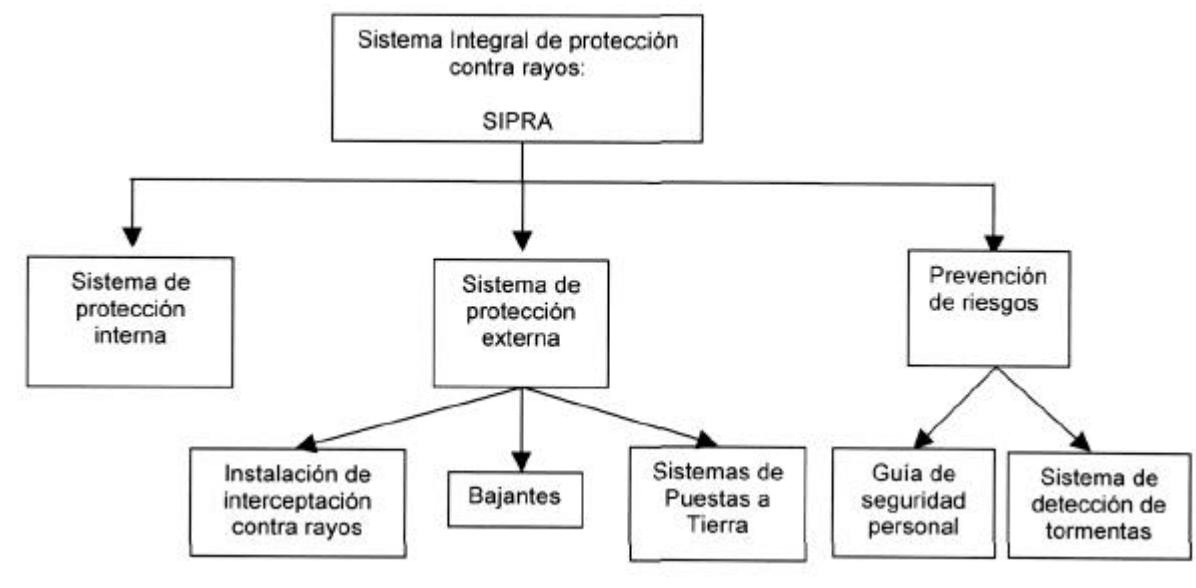
	Barraje equipotencial		Varistor
	Caja de inspección		Electrodo de puesta a tierra
	Canales, tuberías, bajantes de ventilación		Vía de chispas
	Concretos reforzados con conexiones a los refuerzos		Mástil sobre el techo
	Conductor bajo el techo, pañete o piso		(Pararrayos) Terminal de captación
	Conector desnudo y conexión		Masa
	Conductor interceptador de rayos		Puesta a tierra
	Conductor subterráneo		Techo falso
	Conductor flexible		Tubería metálica G = Gas, A = Agua, C = Calefacción, E = Eléctrica

## 5. SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

### 5.1 GENERALIDADES

Respecto a los rayos se puede afirmar, sin lugar a dudas, que no existen medios para evitarlos pero existen medidas que ofrecen seguridad a las personas y a los equipos eléctricos y electrónicos. Por tanto, las precauciones de protección apuntan hacia los efectos y a las consecuencias de un rayo

En la Figura 3 se presenta esquemáticamente el Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA), que se recomienda sea utilizado en Colombia.



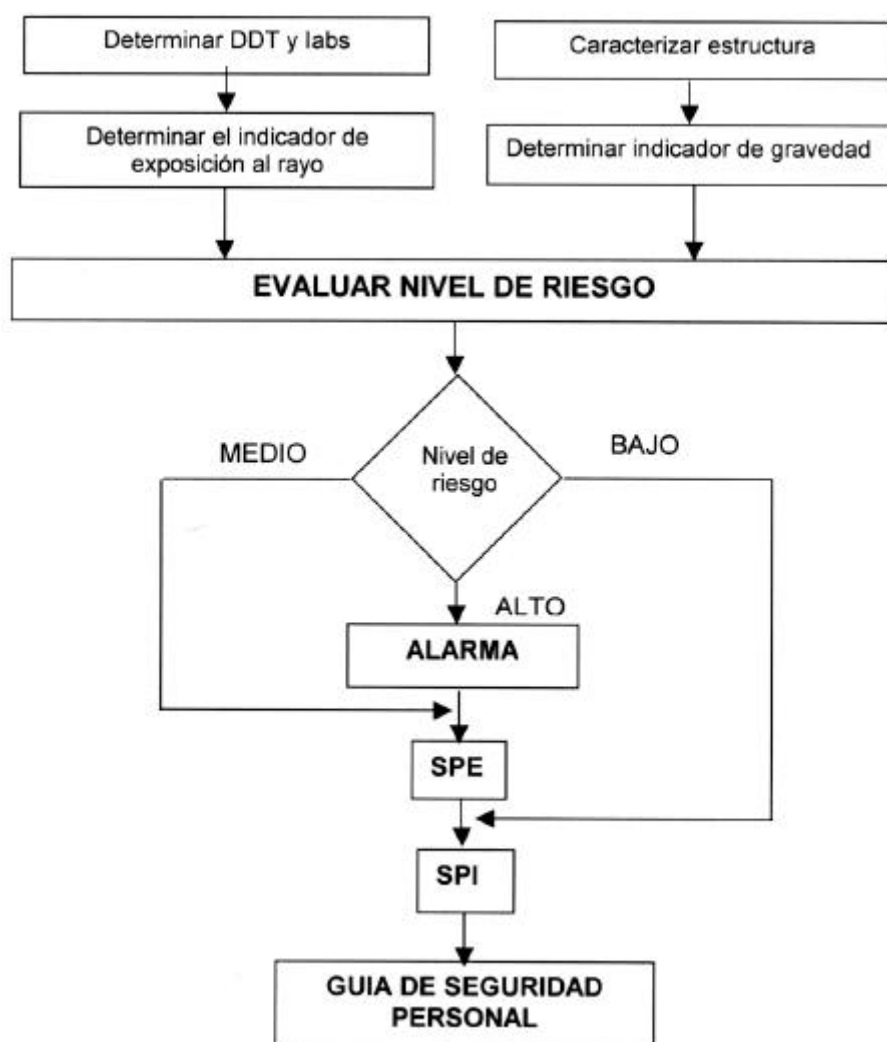
COMPONENTE	FUNCIÓN QUE CUMPLE
1. Sistema de protección interno	Limitar las sobretensiones transitorias al interior de la instalación.
1.1 Equipotencialización con DPS o conductores	Limitar sobretensiones.
1.2 Apantallamientos localizados	Reducir efectos internos del campo magnético en equipos electrónicos.
1.3 Topología de cableados	Contribuir a la compatibilidad electromagnética
1.4 Instalación de filtros	Controlar las perturbaciones conducidas
2. Sistema de protección externo	Canalizar el rayo hasta el suelo en forma segura
2.1 Terminales de captación	Interceptar el rayo
2.2 Bajantes	Conducir el rayo, reducir el di/dt, atenuar efectos internos de campo magnético
2.3 Puestas a tierra de protección contra rayos	Dispersar y disipar la corriente del rayo.
3. Prevención de riesgos	
3.1 Guía de seguridad personal	Lograr comportamientos seguros de las personas
3.2 Sensor de tormentas: fijo o portátil	Suspender actividades de alto riesgo

**Figura 3. Sistema Integral de protección contra rayos - SIPRA**

## 5.2 METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL NIVEL DE RIESGO Y ESTABLECER LAS ACCIONES DE PROTECCIÓN

La evaluación del nivel de riesgo se realiza para determinar si se requiere implementar un sistema de protección contra rayos y las acciones que permitan disminuir el riesgo a un nivel tolerable.

El nivel del riesgo se obtiene de la ponderación de los indicadores de exposición al rayo y de la gravedad que puede implicar un impacto directo o indirecto de rayo sobre una estructura.

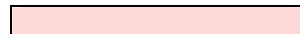


El indicador de exposición al rayo de la Tabla 1 se obtiene a partir de la densidad de descargas a tierra - DDT, y la corriente pico absoluta promedio -  $I_{abs}$ , expresada en kiloamperios, asignando una mayor relevancia a la primera de éstas, debido a que existe mayor probabilidad de que una estructura se vea afectada dependiendo de la cantidad de descargas a la que está expuesta, que de la intensidad de las mismas. Por esta razón, se tomaron proporciones de 0,7 para la DDT y de 0,3 para la  $I_{abs}$ . Los valores de  $I_{abs}$  y de DDT deben tener el 50 % de probabilidad de ocurrencia o menos, a partir de datos multianuales. Además se debe tomar un área de 9 km<sup>2</sup> (3 km x 3 km) o menos, teniendo en cuenta la exactitud en la localización (*Location Accuracy*) y la exactitud en la estimación de la corriente pico de retorno (*Lightning Peak Current Accuracy*) del sistema de localización de rayos<sup>1</sup>, véase el Anexo A. Al encontrar la DDT con sistemas de localización confiables, implícitamente se considera la latitud y la orografía del área, es decir, montaña, ladera, plano.

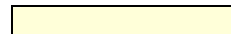
<sup>1</sup> La información pormenorizada puede ser obtenida por medio de la RECMA en ISA.

**Tabla 1. Indicador de parámetros del rayo**

Densidad de descargas a tierra [ Descargas/km <sup>2</sup> - año]	Corriente pico absoluta promedio [kA]		
	40 ≤ I <sub>abs</sub>	20 ≤ I <sub>abs</sub> < 40	I <sub>abs</sub> < 20
30 ≤ DDT			
15 ≤ DDT < 30			
5 ≤ DDT < 15			
DDT < 5			



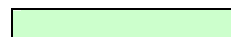
Severos



Altos



Medios



Bajos

Sumando los valores de los subindicadores relacionados con la estructura, como son el uso, el tipo y la combinación de altura y área, de acuerdo con las Tablas 3, 4 y 5 se obtiene el indicador de gravedad (I<sub>G</sub>) de la Tabla 2, que se puede presentar en la estructura.

$$I_G = I_{USO} + I_T + I_{AA}$$

en donde

$I_{USO}$	=	Subindicador relacionado con el uso de la estructura
$I_T$	=	Subindicador relacionado con el tipo de estructura
$I_{AA}$	=	Subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura

Para obtener el indicador de gravedad se suman los subindicadores relacionados con el uso, tipo y geometría de la estructura.

**Tabla 2. Indicador de Gravedad**

Resultado de la suma de subindicadores de estructura	Indicador de Gravedad
0 a 35	Leve
36 a 50	Baja
51 a 65	Media
66 a 80	Alta
81 a 100	Severa

A continuación se presentan las tablas para obtener los sub-indicadores

**Tabla 3. Subindicador relacionado con el uso de la estructura**

Clasificación de estructuras	Ejemplos de estructura	Indicador
<b>A</b>	Teatros, centros educativos, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas al aire libre, parques de diversión, aeropuertos, hospitales, prisiones	40
<b>B</b>	Edificios de oficinas, hoteles, viviendas, grandes industrias, áreas deportivas cubiertas.	30
<b>C</b>	Pequeñas y medianas industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	20
<b>D</b>	Estructuras no habitadas	0

**Tabla 4. Subindicador relacionado con el tipo de estructura**

Tipo de estructura	Indicador
No metálica	40
Mixta	20
Metálica	0

**Tabla 5. Subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura**

Altura y área de la estructura	Indicador
Área menor a 900 m <sup>2</sup>	
Altura menor a 25 m	5
Altura mayor o igual a 25 m	20
Área mayor o igual a 900 m <sup>2</sup>	
Altura menor a 25 m	10
Altura mayor o igual a 25 m	20

NOTA El ingeniero encargado de la evaluación del nivel de riesgo para protección contra rayos, debe tomar en consideración la influencia de estructuras adyacentes a la evaluada.

Para concluir sobre el nivel de riesgo se ponderan los indicadores de exposición al rayo y de gravedad con la Tabla 6:

**Tabla 6. Matriz de niveles de riesgo**

GRAVEDAD PARÁMETROS	Severa	Alta	Media	Baja	Leve
Severo					
Alto					
Medio					
Bajo					

**Nivel de Riesgo de la estructura**

	ALTO
	MEDIO
	BAJO

De acuerdo con el nivel de riesgo el SIPRA debe estar conformado por los componentes que le correspondan según lo establece la Tabla 7.

**Tabla 7. Acciones recomendadas según el nivel de riesgo**

Nivel de riesgo	Acciones recomendadas
NIVEL DE RIESGO BAJO	SPI para acometidas aéreas
	Cableados y PT según NTC 2050 – IEEE 1100
NIVEL DE RIESGO MEDIO	SPI
	Cableados y PT según NTC 2050 – IEEE 1100
	SPE
NIVEL DE RIESGO ALTO	SPI
	Cableados y PT según NTC 2050 – IEEE 1100
	SPE
	Plan de prevención y contingencia

NOTA Como acciones complementarias, especialmente para el nivel de riesgo alto, se debe considerar la implementación de sistemas de protección contra incendios y sistemas de energía eléctrica de respaldo.

### 5.3 SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO – SPE

El SPE comprende los terminales de captación, las bajantes, la PTPR, conectores, herrajes y otros equipos que se requieren para completar el sistema.

#### 5.3.1 Terminales de captación

Tienen la función de interceptar los rayos que pueden impactar directamente sobre la instalación a proteger. Para el diseño de las instalaciones de interceptación de rayos se recomienda utilizar los principios del método electrogeométrico.

En la Tabla 8 se presentan las características que deben cumplir los terminales de captación construidos especialmente para este fin.

**Tabla 8. Características para terminales de captación**

Tipo y material del terminal		Diámetro mínimo (mm)	Espesor mínimo (mm)	Calibre mínimo (AWG)	Ancho (mm)
VARILLA	Cobre	9,6	no aplica	no aplica	no aplica
	Bronce	8	no aplica	no aplica	no aplica
	Acero	8	no aplica	no aplica	no aplica
CABLE	Cobre	7,2	no aplica	2	no aplica
	Acero	8	no aplica	no aplica	no aplica
TUBO	Cobre	15,9	4	no aplica	no aplica
	Bronce	15,9	4	no aplica	no aplica
LAMINAS	Cobre	no aplica	4	no aplica	12,7
	Acero	no aplica	4	no aplica	12,7
	Hierro	no aplica	5	no aplica	12,7



Se debe tener en cuenta que los terminales de captación deben ser preferiblemente varillas sólidas o tubulares en forma de bayonetas; con una altura por encima de las partes altas de la estructura no menor a 0,25 m para intervalos máximos de 6 m entre puntas y no menor a 0,6 m para intervalos máximos de 8 m. En caso de que un terminal exceda los 0,6 m por encima de las partes altas de la estructura se debe sujetar en un punto no menor a la mitad de su altura.

Para estructuras de altura mayor a 25 m sólo podrán utilizarse varillas sólidas y el diámetro mínimo de estas debe ser 16 mm. En cualquier caso estos conductores deben cumplir con la Norma UL 96.

Todo edificio que requiera SPE, tengan o no terminales de captación, debe tener un anillo de apantallamiento en la parte superior de la estructura. Cuando tenga terminales de captación, todos ellos deben estar unidos mediante el anillo.

En una edificación, cualquier elemento metálico que se encuentre expuesto al impacto del rayo, como antenas de T.V., chimeneas, torres de comunicación, y cualquier antena o tubería que sobresalga debe ser tratada como un terminal de captación.

Si el montaje es sobre superficies de aluminio, deben construirse los terminales de captación en aluminio para evitar corrosión galvánica, con las dimensiones descritas anteriormente, y su conexión a la bajante debe realizarse por medio de un conector bimetálico.

Esta norma considera que el comportamiento de todo terminal de captación es como el de un terminal tipo Franklin.

Por razones medioambientales, se recomienda no utilizar dispositivos de interceptación con elementos radiactivos.

NOTA Véase RETIE Capítulo 9 Artículo 45.

### **5.3.2 Bajantes**

El objeto de las bajantes es derivar la corriente del rayo que incide sobre la estructura e impacta en los terminales de captación. El cálculo de las bajantes refleja el compromiso de una protección técnicamente adecuada y económica, puesto que mediante el incremento del número de bajantes, se logra una reducción de la magnitud de la corriente que circula por cada bajante y de su tasa de ascenso; así mismo, se reduce la magnitud de las inducciones magnéticas en los lazos metálicos de la instalación y las diferencias de potencial a tierra.

Por razones eléctricas, mecánicas y térmicas los conductores de las bajantes del sistema equipotencial y derivaciones deben estar de acuerdo con la Tabla 9.

**Tabla 9. Requerimientos para las bajantes**

Altura de la estructura	Número mínimo de bajantes	Calibre mínimo del conductor de acuerdo con el material de este	
		Cobre	Aluminio
Menor que 25 m	2	2 AWG	1/0 AWG
Mayor que 25 m	4	1/0 AWG	2/0 AWG

Cada una de las bajantes debe terminar en un electrodo de puesta a tierra, estar separadas un mínimo de 10 m y siempre buscando que se localicen en las partes externas de la edificación.

Para estructuras de altura superior a 25 m, se deben instalar anillos adicionales al anillo de apantallamiento, distanciados máximo 25 m medidos a partir del nivel del suelo. En estructuras con altura mayor o igual a 25 m, se deben instalar adicionalmente anillos horizontales cada 25 m.

En caso de no cumplir con esta configuración, el ingeniero de diseño debe realizar los análisis de tensión de paso y contacto y se debe garantizar que una persona con resistencia de 1 000  $\Omega$  no vaya a soportar más de 30 J.

La zona de conexión del conductor bajante a los electrodos de puesta a tierra debe tener una protección mecánica y eléctrica mediante tubería aislada de dos metros de longitud.

### **5.3.3 Puesta a tierra de protección contra rayos**

El SPT en una locación comprende la unión de todos los equipos eléctricos, estructuras metálicas, tierra de subestaciones, etc., a una o varias puestas a tierra de resistencia óhmica baja, para establecer una condición equipotencial entre todos los equipos y estructuras, ofreciendo así un camino de baja impedancia a los rayos, la reducción del ruido en telecomunicaciones y un camino de retorno en circuitos eléctricos y electrónicos. Antes de conectar a tierra, todo conductor y las superficies por ser puesta a tierra deben ser limpiadas cuidadosamente de manera que se garantice la continuidad eléctrica. Cada sistema de puesta a tierra debe tener una caja de inspección cuadrada de 0,3 m de lado ó circular de 0,3 m de diámetro con su respectiva tapa removible de concreto de 2 500 psi, provista de manija.

#### **5.3.3.1 Generalidades**

El SPT es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos que contribuye de forma sustancial a la seguridad del personal y de los equipos en caso de la incidencia de un rayo; puesto que provee una equipotencialidad a los equipos y estructuras y ofrece una trayectoria de baja resistencia a la corriente del rayo, permitiendo su dispersión y disipación en el terreno sin causar daño.

Para el diseño de la puesta a tierra de protección contra rayos se debe tener en cuenta:

La resistividad del suelo

La agresividad del suelo (pH)

La estructura física del suelo (rocas, arenas arcillas)

La forma de interconexión con las otras puestas a tierra y los sistemas de protección contra la corrosión.

Los efectos adicionales en otros sistemas eléctricos y de comunicaciones.

Una puesta a tierra además de resistencia, presenta capacitancia e inductancia debido a la configuración de la puesta a tierra; cada uno de estos parámetros R,L,C, influyen en la capacidad de conducción de corriente en el suelo; por lo tanto, no se debe pensar solamente en la resistencia de puesta a tierra sino en una impedancia. Por ejemplo, si se inyecta una onda de impulso de corriente al suelo, similar a la resultante de un rayo, ésta también sufre la oposición de la reactancia inductiva de las conexiones. En caso de corrientes con componentes de alta

frecuencia se debe considerar el efecto capacitivo, principalmente en suelos de alta resistividad porque la capacitancia varía proporcionalmente con el contenido de humedad del suelo.

#### **5.3.3.2 Condiciones de seguridad**

Para el cálculo de las tensiones de paso y contacto se debe utilizar un valor del 50 % de probabilidad de ocurrencia para la corriente de rayo.

Con el objetivo de reducir tensiones de paso y de contacto, y para cumplir con lo establecido sobre el tema en el numeral 5.3.2, se deben instalar mínimo dos electrodos de puesta a tierra interconectados separados a una distancia mínima de 2 veces su longitud, para que no se interfieran entre ellos. Para minimizar los efectos que puedan causar diferencias de potencial ocasionadas por impacto de un rayo a las estructuras metálicas, estas deben estar a un mismo potencial mediante un barraje equipotencial y conexiones equipotenciales, al sistema de puesta a tierra general.

#### **5.3.3.3 Valor y medición de la resistencia**

El valor de la resistencia para cada puesta a tierra del sistema de protección contra rayos debe ser siempre menor que  $10\Omega$ , preferiblemente inferior  $1\Omega$ , de tal forma que al pasar la corriente de rayo a tierra las tensiones de paso y contacto producidas sean inferiores a los valores soportados por los seres humanos.

La resistencia de puesta a tierra en cada locación debe ser medida con el electrodo de corriente a 40 m o más y el de tensión al 62 % del valor escogido. El valor verdadero se obtiene de la medición al 62 % de la distancia del electrodo de corriente, se requiere que las mediciones a diferentes distancias del electrodo de corriente no difieran en  $\pm 5\%$  del valor al 62 %. Si la resistencia del electrodo de puesta a tierra no cumple con el valor establecido, se recomienda hacer tratamiento del terreno con rellenos alrededor de las varillas y de los conductores de unión con suelos de baja resistividad. No es recomendable el uso de sales, porque en corto tiempo se pierde su efectividad. También se pueden instalar contrapesos máximo a 60 m en diagonal con una varilla en el extremo o colocar varillas adicionales, espaciadas 5 m y conectadas con cable # 2/0 AWG.

#### **5.3.3.4 Equipotencialización**

Un sistema equipotencial se compone de un conductor, grupo de conductores o DPS, que unen las diferentes instalaciones que se deben interconectar al BE. Para la protección de las instalaciones eléctricas y electrónicas se debe realizar la interconexión a tierra de todos los sistemas. Con ello se obtiene un potencial común, y se logra que las instalaciones se eleven al mismo potencial, evitando accidentes y fuego, dadas las peligrosas diferencias de potencial y los arcos que puedan aparecer en las instalaciones.

Todas las partes metálicas no portadoras de corriente como ductos de agua, ductos de gas, sistemas eléctricos, etc., se deben conectar a un mismo barraje equipotencial (BE), para disminuir las consecuencias de un rayo, debidas a las grandes diferencias de potencial en la instalación de puesta a tierra. Los conductores del sistema de puesta a tierra que unen puntos de conexión deben ser lo más cortos y rectos. Los BE pueden ser en forma de barras o anillos. Su geometría debe ser muy simple. El espacio libre entre el BE y las paredes debe ser suficiente para una fácil conexión, por ejemplo entre 0,03 m y 0,05 m. La altura sobre el piso debe ser tal que las conexiones, cables, ductos, etc., deben ser tan cortos y rectos como sea posible, esto significa que el BE deberá estar colocado a menos de un metro sobre el piso.

Cada bajante debe terminar en un electrodo de puesta a tierra localizado lo mas cercano posible a la fachada, preferiblemente a una distancia de 50 cm desde el borde de la pared o estructura que soporta la bajante. Unir o separar las tierras involucra un estudio detallado de factores como la evaluación del riesgo para seres humanos, daño de equipos, los valores de corriente de falla, la resistencia de puesta a tierra de cada uno de los sistemas que se van a unir, la resistencia mutua entre sistemas de puesta a tierra. En principio, todas las puestas a tierra deben interconectarse.

### 5.3.3.5 Conexiones

Se debe emplear soldadura exotérmica o conectores que cumplan con las recomendaciones de la NTC 4628 o la IEEE-837, también se requiere tomar medidas adicionales de protección contra la corrosión en suelos muy agresivos.

### 5.3.3.6 Materiales

La PTPR puede construirse con electrodos de varios tipos, como varillas, tubos, mallas y contrapesos. Cuando se requieran electrodos de más de 2,4 m se deben acoplar dos varillas. En cualquier caso se debe cumplir con lo establecido en la Tabla 10, en la NTC 2050 numeral 250-83, ítem c) numeral 2, y en la NTC 2206.

Los conductores utilizados en la PTPR deben ser cables desnudos de cobre electrolítico recocido, según la NTC 2187. Cuando van bajo tierra deben estar enterrados mínimo 0,5 m bajo el nivel del terreno o 0,9 m mínimo bajo las vías.

**Tabla 10. Características de los electrodos**

Tipo de Electrodo	Materiales	Dimensiones mínimas			
		Diámetro mm	Área mm <sup>2</sup>	Espesor mm	Recubrimiento mm
Varilla	Cobre	12,7			
	Acero inoxidable	10			
	Acero galvanizado en caliente	16			70
	Acero con recubrimiento electrodepositado de cobre	14			250
Tubo	Cobre	20		2	
	Acero inoxidable	25		2	
	Acero galvanizado en caliente	25		2	55
Fleje	Cobre		50	2	
	Acero inoxidable		90	3	
	Cobre cincado		50	2	40
Cable	Cobre	1,8 para cada hilo	25		
	Cobre estañado	1,8 para cada hilo	25		
Placa	Cobre		20 000	1,5	
	Acero inoxidable		20 000	6	

### 5.3.4 Mantenimiento

Para que el sistema de protección contra rayos permanezca con el grado de confiabilidad diseñado, se deben seguir las siguientes pautas:

- a) Periodicidad. Para inspeccionar el sistema de protección se debe verificar la resistencia de puesta a tierra cada 3 años; si se tienen terrenos con tratamiento, la revisión debe hacerse cada año.
- b) Época. Debido al riesgo que se está manejando, se debe tener en consideración la caracterización temporal para establecer la programación de los mantenimientos.
- c) Actividades. Como resultado de las inspecciones deben eliminarse los defectos encontrados, cambiando los elementos que presentan corrosión, reparando o reponiendo cables deteriorados, cambiando conectores fundidos o inservibles, limpiar y apretar uniones flojas y ante todo restablecer los valores fijados de las resistencias de puesta a tierra.

## 5.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN INTERNO – SPI

Para evitar que chispas, arcos eléctricos o cortocircuitos que puedan ser originados por sobretensiones transitorias ya sea por impacto directo de rayo en la edificación, o en sus acometidas de servicios (tales como electricidad, teléfono, gas, ductos metálicos), al igual que por tensiones inducidas por impactos indirectos o lejanos, que puedan generar incendios, explosiones o sobretensiones que pongan en riesgo vidas humanas; se debe equipotencializar las acometidas de servicios, pantallas de cables, y otras partes metálicas normalmente no energizadas.

Los lineamientos expuestos están de acuerdo con los principios de coordinación de aislamiento; por lo tanto, los equipos para los cuales se especifican los métodos de mitigación deben tener definido una categoría de sobre tensión; es decir, un nivel básico al impulso (BIL) de acuerdo con su ubicación en las instalaciones. La categoría de sobre tensión se presenta en la Tabla 11.

**Tabla 11. Tensión al impulso que deben soportar los equipos**

Nivel de tensión de operación de los equipos V	BIL requerido en (kV)			
	Contadores	Tableros, interruptores, cables, etc.	Electrodomésticos, herramientas portátiles	Equipo electrónico
	IV	III	II	I
120 – 240 ; 120 / 208	4	2,5	1,5	0,8
254 / 440 ; 277 / 480	6	4	2,5	1,5

Las técnicas para el control de sobretensiones transitorias son:

1. **ABSORCIÓN:** Es la conversión irreversible de energía de una onda electromagnética, en otra forma de energía (normalmente calor) como resultado de la interacción con el material que absorbe. El material es la causa de la conversión.

2.      AISLAMIENTO: Es la separación de dos o más superficies conductoras por medio de un dieléctrico (incluyendo el aire), ofreciendo una alta resistencia al paso de la corriente.
3.      APANTALLAMIENTO: Es la instalación de elementos metálicos que se insertan alrededor de los dispositivos que se desean proteger contra los efectos de un campo. El apantallamiento actúa absorbiendo o reflejando parte de la energía contenida en un campo.
4.      CONEXIONES DEL SISTEMA DE PUESTA TIERRA: Es la aplicación de conceptos estandarizadas para el diseño e instalación de las puestas a tierra y de la red equipotencial.
5.      EQUIPOTENCIALIZAR: Es la acción de Interconectar partes conductoras y/o conductores activos con el sistema de puesta tierra por medio de conductores eléctricos y/o dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias para llevarlas a la mínima diferencia de potencial y así propender por la seguridad.
6.      FILTRAR: Es la modificación de las componentes de frecuencia de una señal mediante un dispositivo que se coloca entre los terminales de un circuito eléctrico.
7.      MINIMIZAR LAZOS INDUCTIVOS: Es la aplicación de los conceptos de cableados (de potencia y de telecomunicaciones) de manera que se reduzca la inductancia de los circuitos de modo diferencial y de modo común.

Algunos ejemplos de aplicación de estas técnicas para mitigar las sobretensiones transitorias son:

1.      Reducir los efectos de la corriente del rayo, encerrando los cables con superficies metálicas, las cuales deben ser conectadas con el sistema de puesta a tierra.
2.      Reducir los efectos inductivos, instalando apantallamientos localizados y ubicando los cableados apropiadamente.
3.      Instalar barrajes equipotenciales - BE para conectar todas las pantallas de cables, estructuras metálicas, etc., con el sistema de puesta a tierra.
4.      Conectar los conductores activos con el BE, mediante la aplicación de dispositivos de protección contra sobre tensiones transitorias - DPS. Las características de los DPS deben ser coordinadas con relación a la energía requerida.

#### **5.4.1 Dispositivos de protección contra sobretensiones - DPS**

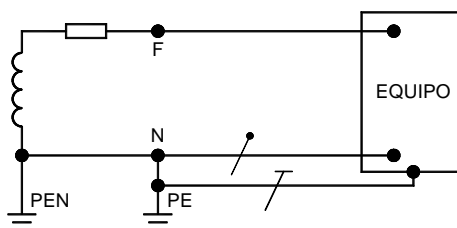
La selección e instalación de DPS depende en gran medida de la combinación de las técnicas que se apliquen en cada instalación. Considerando el amplio uso de los DPS, a continuación se presentan algunos aspectos que se deben tener en cuenta para su selección e instalación.

- a)      Cuando se requieran los DPS, se deberán instalar en el origen de la red interna.
- b)      Los DPS se deben conectar entre los conductores activos y la puesta a tierra o el conductor de puesta a tierra para equipos.

- c) El nivel de protección de los DPS debe ser menor que el nivel básico de aislamiento BIL dado para la categoría II de la Tabla 11.
- d) La máxima tensión de operación continua – MCOV del DPS debe ser mayor o igual al 1,1 veces la máxima tensión nominal línea a neutro.
- e) En caso de falla del DPS su capacidad de cortocircuito junto con los mecanismos internos o externos asociados, debe ser igual o mayor que la máxima corriente de corto circuito esperada en el punto de instalación teniendo en cuenta los aparatos de protección de sobrecorriente especificados por el fabricante del DPS.
- f) Para instalaciones con riesgo bajo y que requieran DPS, la corriente nominal de descarga deberá ser mayor que 5 kA por fase en onda 8/20  $\mu$ s. Para riesgo medio o alto la corriente nominal de descarga deberá cumplir con la Tabla 12.

Los parámetros básicos técnicos mínimos para especificar un DPS son tensión nominal, máxima tensión de operación continua - MCOV, nivel de protección de tensión, corriente nominal de descarga.

La tensión nominal del DPS debe estar de acuerdo con lo establecido en la NTC 1340 para corriente alterna y con la IEC 38 para corriente directa. Así mismo se deben tener en cuenta que el Régimen de conexión a tierra en el sistema colombiano es el TNCS, de acuerdo con la la convención las normas IEC. Véase la Figura 4.



en donde

- TNCS    sistema con el neutro puesto a tierra
- PEN    conductor de neutro y de tierra de protección
- PE      conductor de tierra de protección

**Figura 4. Sistema T-N-C-S (PME)**

La corriente nominal de descarga es el valor cresta de la corriente de impulso para la que está diseñado el DPS sin que se supere el nivel de protección de tensión, esta corriente nominal de descarga debe ser inferior a lo establecido en la Tabla 12:

**Tabla 12. Corriente nominal de descarga por fase**

Indicador de parámetros del rayo (véase Tabla 1)	Onda de prueba	
	DPS con onda de prueba 10/350 ms	DPS con onda de prueba 8/20 ms
Bajo	2 kA	20 kA
Medio	5 kA	50 kA
Alto	10 kA	100 kA
Severo	*	*
* Por acuerdo entre cliente y proveedor		
NOTA Los valores de la tabla son aplicables por cada conductor activo en el punto de conexión de la acometida (véase la NTC 2050)		
NOTA Véase IEEE C 62.41-2		

## **8. APÉNDICE**

### **REFERENCIAS NORMATIVAS**

Los siguientes documentos normativos referenciados son indispensables para la aplicación de este documento normativo. Para referencias fechadas, se aplica únicamente la edición citada. Para referencias no fechadas, se aplica la última edición del documento normativo referenciado. (incluida cualquier corrección).

NTC 2206:1986, Electrotecnia. Equipo de conexión y puesta a tierra.

NTC 2050:1998, Código Eléctrico Colombiano.

NTC 4591:1999, Técnicas de ensayo de alta tensión. Definiciones generales y requisitos de ensayo.

NTC 2187:2000, Conductores de cobre redondos cableado concéntrico compactados

NFPA 780:1997, Standard for the Installation of Lightning Protection Systems.

IEC 61024:1990, Protection of Structures Against Lightning.

IEEE 837:1989, Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding.

IEEE 1100: 1999, Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment

UL 96: 1994, UL Standard for Safety Lightning Protection Components.

## **9. BIBLIOGRAFIA**

IEEE C 62.41.1:2002, Guide on the Surge Environment in Low-Voltage (1 000 V and less) AC Power Circuits

IEEE C 62.41.2:2002, Recommended Practice on characterization of Surges in Low-Voltage (1 000 V and less) AC Power Circuits.

IEEE C 62.45:2002, Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1 000 V and Less) AC Power Circuits.



**ANEXO A**  
(Normativo)

**DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA DE LAS PRINCIPALES CIUDADES Y POBLACIONES DE COLOMBIA**

Ciudad		Rango de DDT (rayos / km <sup>2</sup> x año) para áreas de 3 km x 3 km
Arauca	Puerto Inirida	1-2
Barranquilla	Riohacha	
Bogotá	San Andrés	
Bucaramanga	San José del Guaviare	
Cali	Tumaco	
Cartagena	Tunja	
Cúcuta	Valledupar	
Florencia	Villavicencio	
Ipiales	Armenia	
Leticia	Ibagué	
Mitú	Manizales	
Mocoa	Medellín	
Neiva	Montería	
Pasto	Ocaña	
Popayán	Santa Marta	
Puerto Carreño	Sincelejo	
	Yopal	
Corozal	Magangue	3-5
Pereira	Turbo	
Girardot		
Barrancabermeja		6-9
Quibdó		
Samana		10-14
El Banco		
Bagre		
Remedios		
La Palma		
Nechí		15-20
Zona rural de Quibdó		8-14
Zona rural de la Palma		8-12
Zona Rural de Samaná		10-16
Serranía de San Lucas y Estribaciones		20-40
Magdalena Medio		8-16

**ANEXO B**  
(Normativo)**GUÍA GENERAL DE SEGURIDAD PERSONAL DURANTE TORMENTAS ELÉCTRICAS**

Durante una tormenta eléctrica son evidentes los peligros a los que se exponen, no solo las edificaciones y los sistemas eléctricos y electrónicos, sino las personas. Es por ello que se deben conocer algunas recomendaciones para tener en cuenta durante una tormenta, evitando riesgos para las personas.

El riesgo de ser alcanzado por un rayo es mayor entre las personas que trabajan, juegan, caminan o permanecen al aire libre durante una tormenta eléctrica.

En la zona central colombiana (Cundinamarca, Antioquia, Boyacá, Santander, Caldas, Quindío, Risaralda, Valle del Cauca y los llanos) la actividad de rayos es más intensa durante los meses de abril, mayo, octubre y noviembre; en la zona caribe colombiana (Atlántico, Magdalena, Sucre, Córdoba, Guajira) durante los meses de julio y agosto y en la zona sur (Amazonas, Cauca y Putumayo) durante los meses de diciembre y enero.

La actividad de rayos se presenta generalmente en las tres zonas descritas entre las 2 y las 6 de la tarde y en algunas zonas especiales como el Magdalena Medio en horas de la noche y en la madrugada.

Cuando se tenga indicios de tormenta eléctrica es recomendable, como medida de protección, tener en cuenta las siguientes instrucciones:

- Aterrice y proteja adecuadamente los equipos sensibles de uso eléctrico, electrónico, telefónico o de comunicaciones contra sobretensiones de acuerdo con los criterios y recomendaciones presentadas en esta norma, de lo contrario desconéctelos retirando el enchufe del tomacorriente evitando así el uso de ellos.
- Busque refugio en el interior de vehículos, edificaciones y estructuras que ofrezcan protección contra rayos.
- A menos que sea absolutamente necesario, no salga al exterior ni permanezca a la intemperie durante una tormenta eléctrica.
- Permanezca en el interior del vehículo, edificación o estructura hasta que haya desaparecido la tormenta.

Protéjase de las rayos en:

- Contenedores totalmente metálicos.
- Refugios subterráneos.
- Automóviles y otros vehículos cerrados con carrocería metálica.
- Viviendas y edificaciones con un sistema adecuado de protección contra rayos.

Estos sitios ofrecen poca o ninguna protección contra rayos:

- Edificaciones no protegidas alejadas de otras viviendas.
- Tiendas de campaña y refugios temporales en zonas despobladas.
- Vehículos descubiertos o no metálicos.

Aléjese de estos sitios en caso de tormenta eléctrica:

- Terrenos deportivos y campo abierto.
- Piscinas, playas y lagos.
- Cercanía a líneas de transmisión eléctrica, cables aéreos, vías de ferrocarril, tendederos de ropa, cercas ganaderas, mallas eslabonadas y vallas metálicas.
- Árboles solitarios.
- Torres metálicas: de comunicaciones, de líneas de alta tensión, de perforación, etc.

Si debe permanecer en una zona de tormenta:

- Busque zonas bajas.
- Evite edificaciones sin protección adecuada y refugios elevados.
- Prefiera zonas pobladas de árboles, evitando árboles solitarios.
- Busque edificaciones y refugios en zonas bajas.

Si se encuentra aislado en una zona donde se este presentando una tormenta:

- No se acueste sobre el suelo.
- Junte los pies.
- No escampe bajo un árbol solitario.
- No coloque las manos sobre el suelo, colóquelas sobre las rodillas.
- Adopte la posición de cuclillas.

Para comprobar que estas recomendaciones de la guía se conviertan en acciones preventivas se presenta a continuación una lista de verificación que puede ser implementada y evaluada periódicamente para tomar los correctivos que sean necesarios. Si las respuestas son afirmativas

## NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4552 (Primera actualización)

en todos los casos se puede concluir que se están tomando las medidas adecuadas para la protección del personal.

PREGUNTA	RESPUESTA
¿Durante una tormenta eléctrica se evita que haya personal trabajando al aire libre?	
¿Durante una tormenta eléctrica se evita que haya personal caminando al aire libre?	
¿Durante una tormenta eléctrica se evita que haya personal que permanece al aire libre?	
¿Durante una tormenta eléctrica permanece el personal, dentro de vehículos y edificaciones?	
¿Durante una tormenta se evita la cercanía del personal a terrenos deportivos y campo abierto?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a piscinas, playas, lagos.?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a líneas de transmisión, redes y subestaciones eléctricas.?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a torres de comunicaciones?	
Durante una tormenta se evita escampar en árboles solitarios?	
Durante una tormenta se evita la cercanía a vías de ferrocarril, oleoductos y ducterías metálicas?	
Se aleja al personal durante una tormenta, de mallas eslabonadas, cercas, vallas metálicas, tendederos de ropa?	
Se evita que el personal se acerque durante una tormenta, a grandes tanques metálicos?	
Durante una tormenta se aleja al personal de las partes altas?	
Se evita el uso de vehículos no metálicos ante una tormenta?	
Se utilizan contenedores totalmente metálicos, como refugio ante tormentas?	
Se utilizan refugios subterráneos en caso de tormenta?	
Se utilizan automóviles y otros vehículos cerrados con carrocería, como refugio ante tormentas?	
Se evita acostarse en el suelo mientras se está presentando una tormenta?	
Se evita colocar las manos en el suelo mientras se está presentando una tormenta?	
Se juntan los pies mientras se está presentando una tormenta?	
Se adopta la posición de cuclillas por el personal que se encuentra aislado, mientras se está presentando una tormenta?	
Se evita la cercanía de árboles cuyas ramas están próximas a redes eléctricas?	
Se desconectan los aparatos eléctricos cuando se inicia una tormenta.?	
Se desconectan los equipos telefónicos cuando se inicia la tormenta.?	
Se evita el uso de aparatos eléctricos en el momento de la tormenta.?	
Se evita el uso de aparatos electrónicos en el momento de la tormenta.?	
Se evita el uso de aparatos telefónicos en el momento de la tormenta.?	
Se evita el contacto con cables, alambres, tubería metálica de agua, energía, gas, etc, durante una tormenta.?	
<b>TOTAL RESPUESTAS (Sí)</b>	
<b>Porcentaje acciones positivas</b>	

**ANEXO C**  
(Normativo)**SISTEMA DE ALARMA**

Para completar el sistema integral de protección contra rayos propuesto en la Figura 4 y dado que no existe una protección contra rayos que sea completamente segura, se debe considerar, la instalación de una alarma de prevención de rayos, con el fin de avisar al personal para que se tomen las precauciones respectivas y para desconectar manual o automáticamente equipos electrónicos o de comunicación susceptibles de daño.

El sistema de alarma debe cumplir, entre otras, con las siguientes especificaciones mínimas:

- Su resolución debe ser omnidireccional, es decir que cubra 360°.
- La eficiencia en la detección de rayos debe ser 100 % en un radio de 30 km.
- Debe activarse únicamente por detección de rayos, es decir, que no se generen falsas alarmas por señales de otro origen.
- Debe predecir si existe una alta probabilidad de rayos dentro de un radio de 15 km, para un intervalo de tiempo de 10 min a 15 min (tiempo que se considera prudente para que las personas puedan poner en práctica las instrucciones dadas en la Guía general de Seguridad Personal), Anexo A.
- La alarma debe ser audible en un radio mínimo de 200 m.

**ANEXO D**  
(Informativo)

**EJEMPLO ILUSTRATIVO DE APLICACIÓN DE ESTA NORMA**

**D.1    OBJETIVO**

Diseñar el sistema integral de protección contra rayos de un edificio de oficinas de las siguientes características: Ubicado en la ciudad de Bogotá (4° 43' latitud norte y 74°09' longitud Oeste, altitud 2 600 msnm), tiene siete pisos, está construido de concreto reforzado, tiene 1 000 m<sup>2</sup> de área con una altura de 28 m, el cual tiene una escalera metálica en un costado.

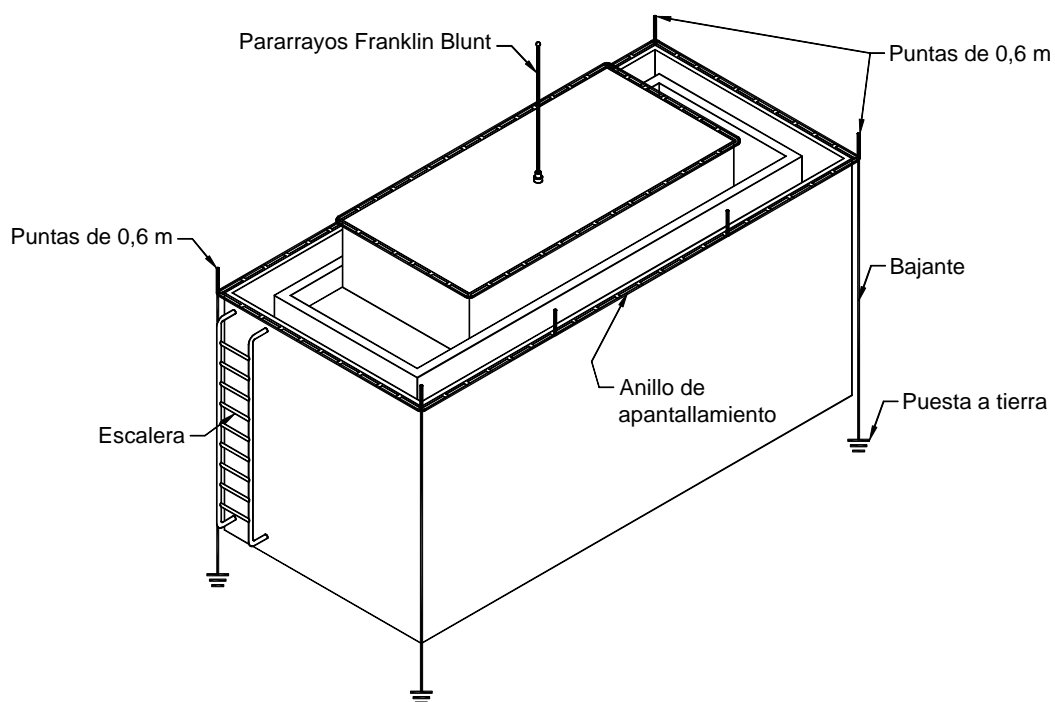
**D.2    EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO POR RAYOS**

Aplicando la metodología para la evaluación del nivel de riesgo, se concluye que el nivel de riesgo es “**ALTO**”.

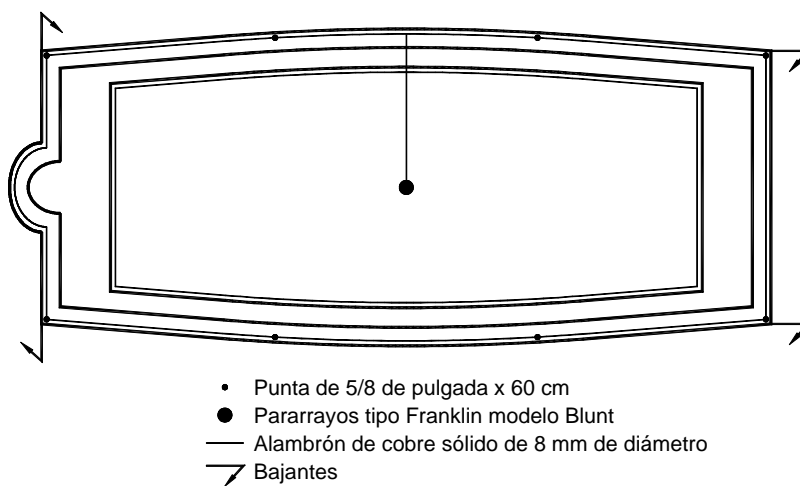
**D.3    SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO (SPE)**

**D.3.1    Especificaciones de protección externa**

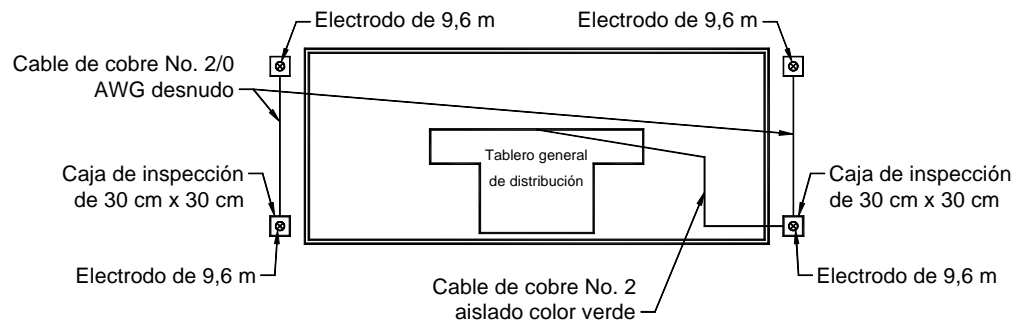
Componente	Especificación
Pararrayos (Interceptación)	El apantallamiento se compone de dos anillos en alambre de cobre de 8 mm de diámetro, 8 terminales de captación de 0,6 m x 5/8 de pulgada en cobre sólido y un pararrayos modelo <i>Blunt</i> soportado en un mástil de 6 metros por 1 1/4 de pulgada de diámetro, en acero galvanizado. Todos los materiales cumplen con las disposiciones de las normas NTC 4552 e IEC 61024-1.
Bajantes (Conducción)	La conducción a tierra se hará con cuatro bajantes; una está compuesta por la escalera metálica (bajante natural); para las otras tres se utilizó cable de cobre de 19 hilos, 1/0 AWG y 96,66 % de conductividad, ubicadas en cada una de las esquinas restantes.
Puesta a tierra (Dispersión y disipación)	Se tomó una resistividad aparente del terreno de 200 $\Omega$ .m (arcillas consolidadas). Para la puesta a tierra de esta edificación se utilizaron cuatro electrodos tipo varilla, en cobre sólido, cada uno de 5/8" x 9,6 m y cable de cobre 2/0 AWG (véase el Anexo 3). Para las conexiones se empleó soldadura exotérmica o conectores que cumplen con las recomendaciones de las normas IEC 60364-5-54 / 542.3.2, NTC 4628 o la IEEE-837.
Equipotencialización	En la parte superior e inferior del edificio se unieron eléctricamente las varillas de refuerzo del concreto a las bajantes. Todo elemento metálico que se encontraba a una distancia menor o igual a 1,8 m de los terminales de captación o las bajantes, se interconectaron eléctricamente a ellos. Todos los barrajes equipotenciales se montaron sobre aisladores.



**Figura D.1. Esquema de apantallamiento y bajantes**



**Figura D.2. Vista en planta**



**Figura D.3. Puestas a tierra de protección contra rayos**

#### **D.4     PROTECCIONES INTERNAS**

##### **DPS PARA TRANSFORMADOR**

- Tensión nominal: 11,4 kV Fase - Fase.
- Modo de protección: Fase -Tierra.
- Tensión de corte: mayor o igual a 9,3 kV
- Temperatura de operación: -20 °C a 50 °C
- MCOV: 7 240 V rms (L-N).
- Corriente de descarga: mayor o igual a 10 kA
- Norma que debe cumplir: NTC 2878

##### **DPS PARA TABLERO PRINCIPAL**

- Tensión nominal: 120/208 V, 3Ø, 4 hilos más tierra.
- Modo de protección: Fase-Fase y Fases-Neutro.
- Tensión de corte: mayor o igual a 283 Vpico (L-N) y menor o igual a 600 Vpico (L-N).
- Tiempo de respuesta: menor a 5 ns
- MCOV: 150 Vrms (L-N).



**CONDICIONES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

- Los anillos de apantallamiento serán montados sobre aisladores de 5 cm de altura fijados con perno de anclaje.
- Las bajantes serán alojadas dentro de tubería EMT de 3/4 de pulgada.
- La tubería se conectará eléctricamente a la bajante en la parte superior y en la inferior.
- Los conductores horizontales deben quedar a una profundidad de 50 cm.
- Las cabezas de electrodos tipo varilla deben quedar a una profundidad mínima de 30 cm.
- Todas las conexiones que queden bajo tierra, se harán con soldadura exotérmica.
- Los conductores de cada circuito se deben entorchar con el ánimo de reducir las pérdidas, generar un camino de alta impedancia ante señales conducidas de alta frecuencia asociadas a los rayos y reducir las tensiones inducidas.
- Los tomacorrientes monofásicos de los equipos electrónicos deben ser con polo a tierra aislado del cajetín de montaje, de acuerdo las especificaciones de la norma IEEE 1100/8.5.3.2.1.
- Los barrajes de neutro deben dimensionarse al 200 % cuando sirve a cargas no lineales (cargas electrónicas), de acuerdo con la IEEE 1100/8.4.2.3.
- Los conductores de neutro deben ser del doble del calibre que los conductores de fase, cuando son circuitos trifásicos o bifásicos, conforme lo recomienda la IEEE 1100/8.4.5.2.

**CANTIDADES DE OBRA**

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	U	CANTIDAD
<b>1</b>	<b>Terminales de captación, bajantes y equipotencialización</b>		
1,1	Pararrayos tipo Franklin modelo <i>Blunt</i>	u	1
1,2	Varillas en cobre sólido de 60 cm x 5/8 de pulgada	u	8
1,3	Alambre de cobre desnudo de 8 mm de diámetro	m	240
1,4	Cable de cobre 7 hilos No. 2 AWG desnudo	m	120
1,5	Aisladores para anillo de apantallamiento	m	250
1,6	Tubería EMT de 1 pulgada	m	155
1,7	Uniones para tubería EMT de 1 pulgada	u	82
1,8	Curvas para tubería EMT de 1 pulgada	u	15
1,9	Tubo de acero galvanizado de 1 1/2 de pulgada	m	6
1,10	Soporte para tubo de acero galvanizado	u	1
1,11	<i>Kits</i> de tierra para tubería metálica	u	12
1,12	Soldadura exotérmica	pto	22
1,13	Abrazaderas metálicas	u	103
1,14	Pernos de anclaje	u	457
<b>2</b>	<b>Puesta a tierra</b>		
2,1	Cable de cobre 7 hilos no. 2/0 AWG desnudo	m	45
2,2	Cable de cobre 7 hilos no. 2 AWG aislado	m	35
2,3	Soldadura exatérmica	pto	9
2,5	Caja de inspección	u	2
2,6	Electrodo de cobre de 5/8 de pulgada x 9,6 m	u	5
2,8	Perforación	m	38,4
2,9	Excavación manual	m <sup>3</sup>	2,4
2,10	Corte de piso con cortadora	m	3
2,11	Demolición de piso	m <sup>2</sup>	0,54
<b>3</b>	<b>Informe de obra</b>		
3,1	Actualización <i>dse</i> planos <i>as-built</i>	u	1
3,2	Medición de resistencia de puesta a tierra	u	1
3,3	Registro fotográfico	u	1

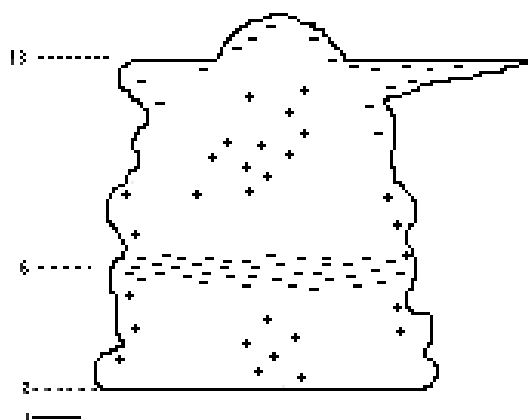
**ANEXO E**  
(Informativo)**LA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA O RAYO**

La Descarga Eléctrica Atmosférica o más comúnmente conocida como Rayo es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera. Los rayos nube - tierra han sido los más estudiados debido, fundamentalmente, a su influencia directa sobre los seres vivos y a las perturbaciones que causan en dispositivos, equipos o sistemas eléctricos, electrónicos o de comunicaciones.

**E.1 ESTRUCTURA TRIPOLAR DE LA NUBE DE TORMENTA**

Durante buena parte del siglo veinte investigadores de diferentes partes del mundo estudiaron la estructura eléctrica de las nubes de tormenta. Hoy en día es aceptado por la gran mayoría de la comunidad científica internacional que una nube de tormenta presenta una estructura de carga eléctrica tripolar: con una región principal negativamente cargada y comprendida entre dos regiones cargadas positivamente, según se muestra en la Figura E.1.

El campo eléctrico es más intenso en las fronteras superior e inferior de la región de carga negativa, la cual a su vez determina muy frecuentemente el campo eléctrico en la superficie terrestre, debido a que la región inferior de carga positiva es muy pequeña.



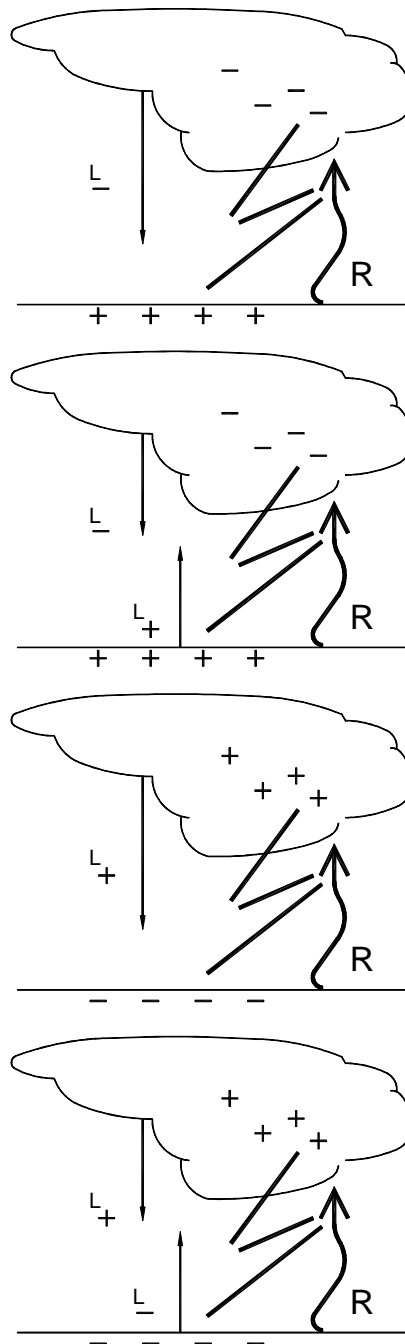
escala en kilómetros

**Figura E.1. Estructura tripolar de la nube**

**E.2 TIPOS DE RAYOS**

Según *Berger* (1978) los rayos se pueden dividir en cuatro tipos, de acuerdo con la dirección de movimiento: ascendentes o descendentes y de acuerdo con la polaridad del líder que inicia la descarga: positiva o negativa, según se muestra en la Figura D.2. Un rayo descendente negativo se inicia en la carga negativa de la nube y la mayor parte de la trayectoria entre nube y tierra es cubierta por el líder descendente. Un rayo de polaridad positiva está asociado a la carga positiva dentro de la nube, y la dirección de movimiento está definida por el líder que cubre la mayor parte del canal de la descarga.

Hasta ahora ha sido aceptado a escala mundial que las descargas más comunes son descendentes de polaridad negativa, sin embargo, en Colombia<sup>2</sup> se ha encontrado que en algunas zonas, por ejemplo el Magdalena Medio, y en meses determinados, las descargas son en su mayoría descendentes de polaridad positiva.



**Figura E.2. Cuatro tipos de rayos, según Berger (1978)**

<sup>2</sup> Torres, H., Castaño, O. *El rayo*. Bogotá: ICONTEC, 1994. p. 30.

### **E.3    ETAPAS DE UNA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA<sup>3</sup>**

La mayoría de las descargas nube - tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe entre la carga situada debajo de la nube y la carga de polaridad opuesta ubicada en su base.

En términos generales las etapas que comprende una descarga eléctrica atmosférica son:

#### **E.3.1    Encendido de la descarga (*Preliminary Breakdown*)**

Ocurre en el interior de la nube, pero no hay acuerdo entre los investigadores sobre la forma exacta y localización del encendido de la descarga en el interior de la nube.

#### **E.3.2    Líder escalonado (*Stepped Leader*)**

Inicia la primera descarga de retorno en un rayo mediante su propagación desde la nube hacia la tierra en pasos discretos.

#### **E.3.3    Proceso de enlace (*Attachment Process*)**

A medida que la punta del líder avanza hacia la tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos o en irregularidades propias del terreno crece hasta alcanzar el valor de disrupción en el aire y una o más descargas ascendentes son iniciadas desde esos puntos.

#### **E.3.4    Descarga de Retorno (*Return Stroke*)**

El canal líder se descarga cuando la onda de potencial de tierra se propaga continuamente hacia arriba por el canal de la trayectoria del líder descendente, que ha sido previamente ionizado.

#### **E.3.5    Líder Dardo (*Dart Leader*)**

Las descargas de retorno que ocurren después de la primera son iniciadas generalmente por líderes dardo. El líder dardo deposita carga en el canal remanente de la descarga previa, el cual puede componerse de una o más ramas principales si la descarga anterior fue la primera, y de esta manera el canal se pone en un potencial alto respecto a la tierra, estableciendo la etapa o fase para las subsecuentes descargas de retorno. Según lo dicho anteriormente, un rayo (lightning) se compone de varias descargas de retorno, lo que comúnmente se conoce como multiplicidad del rayo.

#### **E.3.6    Tiempo de frente ( $T_F$ ) y tiempo de cola ( $T_C$ ) de la onda de corriente del rayo**

Para definir el tiempo de frente y el tiempo de cola de la onda de un rayo se deben tomar los puntos en que la magnitud de la corriente es el 10 % y el 90 % del valor pico (véase la Figura E.3). Luego se traza una recta entre estos dos puntos. Llamaremos esta recta  $\overline{AB}$ . Se toma como punto inicial para medir los tiempos, el punto donde la recta  $\overline{AB}$  corta el eje de tiempo.

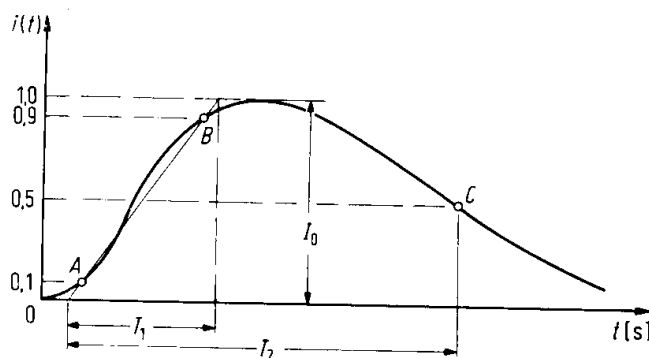
El  $T_F$  es el tiempo medido entre el punto inicial y un punto obtenido por la proyección sobre el eje del tiempo de la intersección entre la recta  $\overline{AB}$  y el 100 % del valor pico. El tiempo de frente también es equivalente a 1,25 veces el tiempo entre los instantes en que la magnitud de la onda es 10 % y 90 % del valor pico.

El  $T_C$  es el tiempo medido entre el punto inicial y el instante en que la onda ha decaído al 50 % de su valor pico.

---

<sup>3</sup> Uman, M. *The Lightning Discharge*. Academic Press, 1987. p. 8-9., International Geophysics series; vol. 39.

Según la NTC 4591, la onda de tensión normalizada es  $1,2 \mu s \pm 30 \% / 50 \mu s. \pm 20 \%$ ; y la de corriente normalizada es  $8 \mu s \pm 10 \% / 20 \mu s \pm 10 \%$ .



**Figura E.3. Onda de corriente del rayo**

#### **E.4 PARÁMETROS DEL RAYO**

Los parámetros del rayo han sido medidos en latitudes norte o sur pero muy poco en zonas tropicales o semitropicales. Los parámetros recomendados por organismos como VDE y CIGRE se basan en las mediciones directas llevadas a cabo por el investigador K. *Berger* en Monte Salvatore localizado en la frontera Suiza - Italia.

Los parámetros del rayo están siendo evaluados por el comité CIGRE 33.01 "*Lightning*". Dentro de este comité se ha propuesto tener en cuenta la variación espacial y temporal de dichos parámetros.

Hasta tanto no se publiquen los valores actualizados se recomienda considerar probabilísticamente los valores sugeridos por CIGRE en la latitud norte o los estimados para Colombia a partir de cualquiera de los tres sistemas de medición y localización: RECMA, propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. - ISA (6 sensores tecnología LPATS); Empresas Públicas de Medellín - EEPMP (4 sensores tecnología LLP) y Programa de Adquisición y Análisis de Señales - P.A.A.S. - Universidad Nacional de Colombia (1 sensor TSS-420).

De acuerdo con resultados de investigaciones, se ha planteado la hipótesis que en países tropicales, como Colombia, se pueden esperar valores de parámetros de rayo superiores a los de otras latitudes. Es por ello, que en Colombia se recomienda utilizar, para diseños de protección contra rayos, valores de parámetros de rayo con baja probabilidad de ser superados.

Los principales parámetros del rayo que se tienen en cuenta para protección contra rayos de vidas humanas, semovientes, estructuras y equipos eléctricos y electrónicos se presentan a continuación:

##### **E.4.1 Nivel cerámico (NC)**

Este nivel posee en Colombia la distribución espacio - temporal presentada en el mapa de niveles cerámicos de la Figura 4. Para la evaluación de la actividad de rayos en el área de estudio, se debe tener presente la dinámica temporal multianual del fenómeno y representar el NC mediante una distribución de probabilidad acumulada.

**NOTA** Este mapa de niveles cerámicos de Colombia corresponde a los promedios multianuales entre 1974 y 1988, fue elaborado por el convenio Universidad Nacional de Colombia - HIMAT, en caso de alguna aclaración favor dirigirse a los autores.

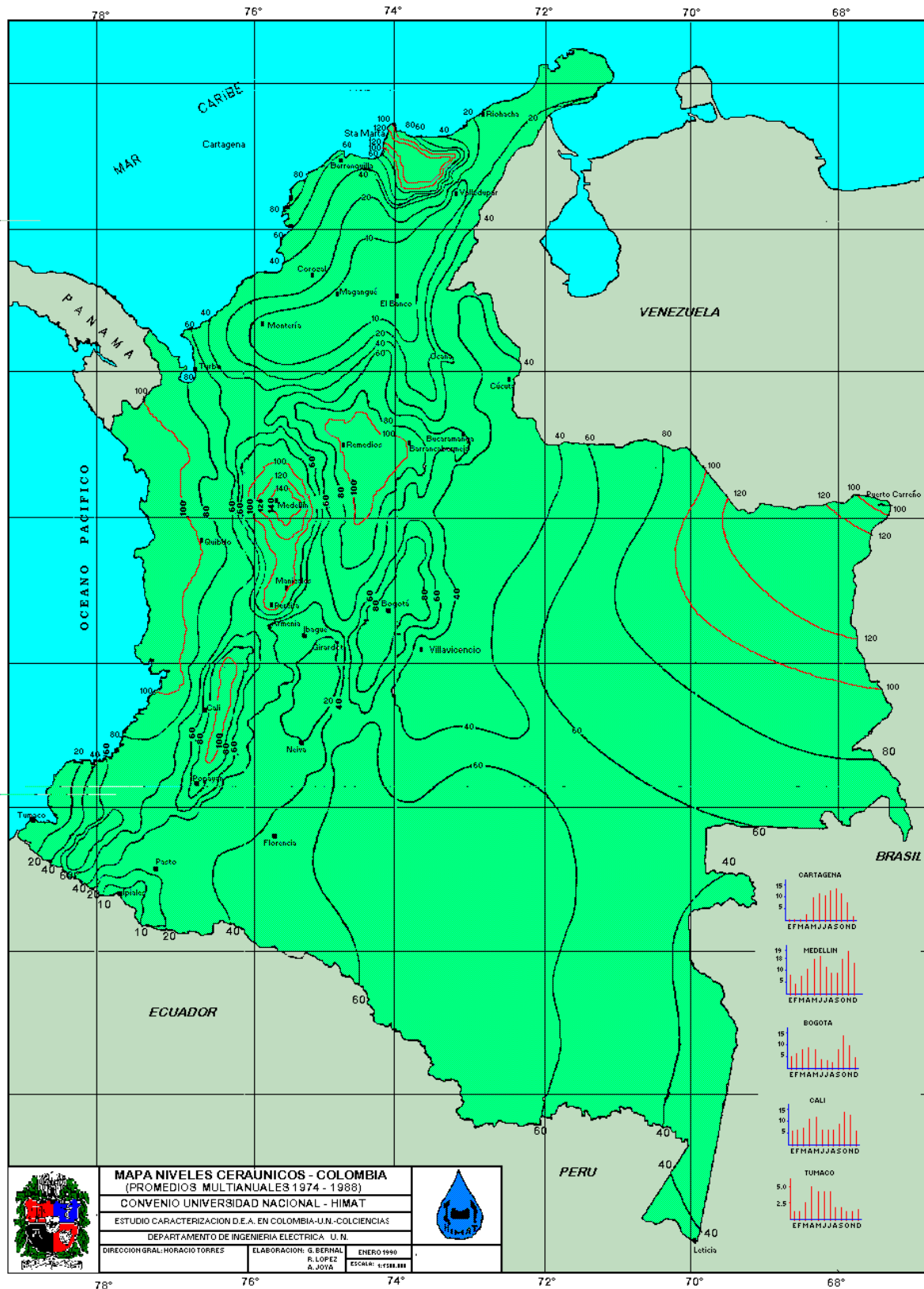


Figura E.4. Mapa colombiano de niveles cerámicos

### **E.4.2 Densidad de Descargas a Tierra (DDT)**

Véase el Anexo A

La densidad es un parámetro complementario al NC, que permite cuantificar la incidencia de rayos en la zona. En Colombia, a partir de los datos de los sistemas de medición y localización de rayos se pueden obtener este y otros parámetros del rayo. En el anexo A se presentan los parámetros de densidad de las principales ciudades y zonas de Colombia.

La relación obtenida para Colombia entre DDT y NC en áreas de 30 km x 30 km ha sido comparada con los resultados obtenidos con la ecuación propuesta por IEC, encontrando diferencias apreciables que llevaron a la necesidad de desarrollar una ecuación para Colombia. Adicionalmente, otras relaciones de DDT y NC han sido encontradas en regiones tropicales montañosas de México y Brasil:

$$\begin{aligned} DDT &= \mathbf{0,024} NC^{1,12} \text{ México} \\ DDT &= 0,0030.NC^{1,12} \text{ Brasil} \\ DDT &= 0,0017.NC^{1,56} \text{ Colombia} \end{aligned}$$

La similitud entre las relaciones encontradas en Brasil y México puede ser atribuida a la localización equidistante a la línea ecuatorial (México [16–28° Norte] y Minas Gerais-Brasil [18–22° Sur]). Sin embargo, la relación encontrada en Colombia para zona montañosa (2-10° Norte) presenta un comportamiento diferente. Las diferencias encontradas al aplicar IEC con respecto a la de Colombia alcanzaron valores hasta de 1568 %.

Además, un comportamiento diferente de los parámetros del rayo en zonas tropicales ha sido observado para regiones montañosas y costeras, encontrándose diferentes ecuaciones para cada tipo de región.

### **E.4.3 Polaridad**

Tipo de carga (positiva o negativa) asociado con la descarga de retorno de rayo.

### **E.4.4 Valor pico de la corriente de retorno del rayo**

También llamado corriente máxima del rayo (*Lightning Peak Current*), dado en kiloamperios, es importante para el cálculo de la caída de tensión de la resistencia al impulso de la puesta a tierra de la instalación cuando el rayo impacta y el cálculo de la distancia de impacto ( $r_s$ ) del rayo a la estructura

La corriente máxima del rayo se estima indirectamente por un sistema localizador de rayos. Tales sistemas tienen sensores remotos que miden el campo eléctrico y/o magnético producido por un rayo a grandes distancias, lo que permite el cálculo de la corriente del rayo.

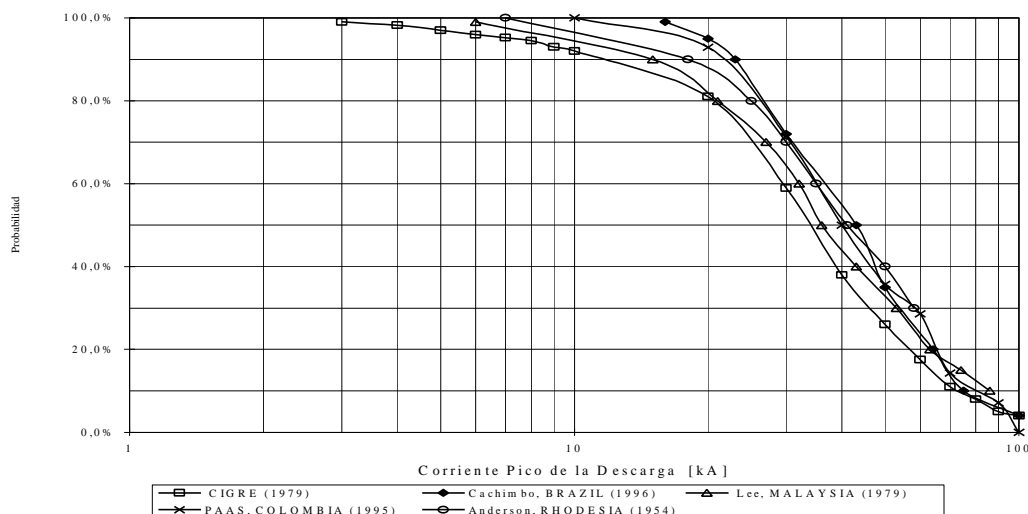
Para estimar la corriente pico, en los sistemas localizadores instalados en Colombia, se asume una relación entre el campo magnético pico y la corriente pico, como lo sugiere el modelo de línea de transmisión modificado - MTL para la descarga de retorno.

La Figura E.4 muestra la curva de probabilidad de corriente de retorno de rayo según los resultados presentados por CIGRE en 1979 de mediciones en latitudes templadas y utilizados en la mayoría de las normas internacionales y los estimados y medidos en cuatro países



tropicales<sup>4</sup>: Brasil (Estación Cachimbo, Estado de Minas Gerais, 1996), Rodesia (Anderson, et. al., 1954), Malasia (Lee, et. al, 1979) y Colombia (Torres, et. al., 1995). Esta gráfica permite ver la mayor probabilidad de magnitud de Corriente de Retorno de la Descarga en Zonas Tropicales (Brasil, Malasia, Colombia y Rodesia), respecto a zonas no tropicales (CIGRE).

Para diseños puntuales de sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas se recomienda hacer estudios de probabilidad de la magnitud de corriente de retorno del rayo para los sitios específicos. En caso de no ser posible se pueden utilizar los valores probabilísticos dados en la Figura E.4



**Figura E.4. Curva de distribución de probabilidad de magnitud de corriente de retorno de rayo para zonas templadas y zona tropical**

#### **E.4.5 Máxima rata de ascenso de la corriente del rayo $(di/dt)_{\text{máx.}}$ (*Current Rate-of-Rise*)**

El valor  $(di/dt)_{\text{máx.}}$  se utiliza para el cálculo de las tensiones electromagnéticas inducidas que se presentan en los lazos metálicos, abiertos o cerrados, en cualquier instalación y son las causantes de daños en equipos electrónicos.

El máximo valor de tensión inducida ( $V_{\text{máx.}}$ ), en Voltios, en un lazo metálico se expresa como:

$$V_{\text{máx.}} = M (di/dt)_{\text{máx}}$$

en donde M es la inductancia propia del lazo metálico, expresada en Henrios, la cual depende de la geometría y,  $(di/dt)_{\text{máx.}}$  es la máxima rata de ascenso de la corriente del rayo expresada en kA/ $\mu$ s.

#### **E.4.6 Cuadrado de la corriente de impulso del rayo $(i^2 dt)$**

Se utiliza para el cálculo del calentamiento y los esfuerzos electromecánicos al circular la corriente del rayo por conductores metálicos.

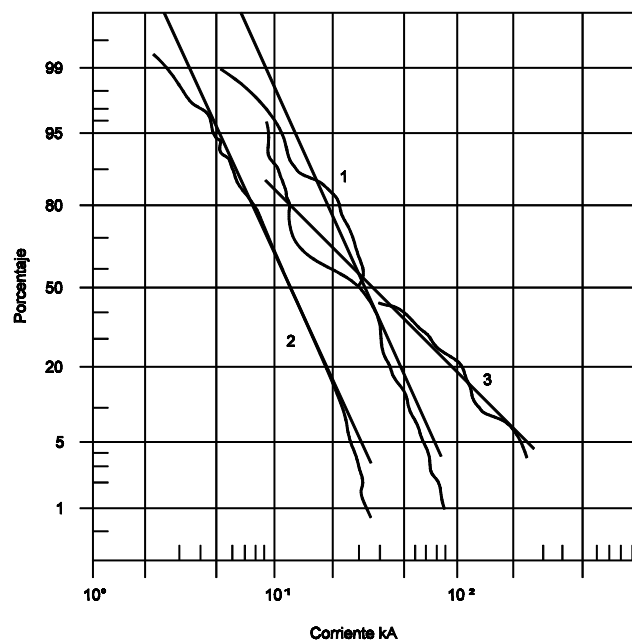
<sup>4</sup> Torres, H. "Espacio y Tiempo en los parámetros del rayo", Trabajo de promoción a Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1999.

Para un conductor de resistencia óhmica  $R$ , la energía  $W$ , disipada en forma de calor, y expresada en Julios, es:

$$W = R \int i^2 dt$$

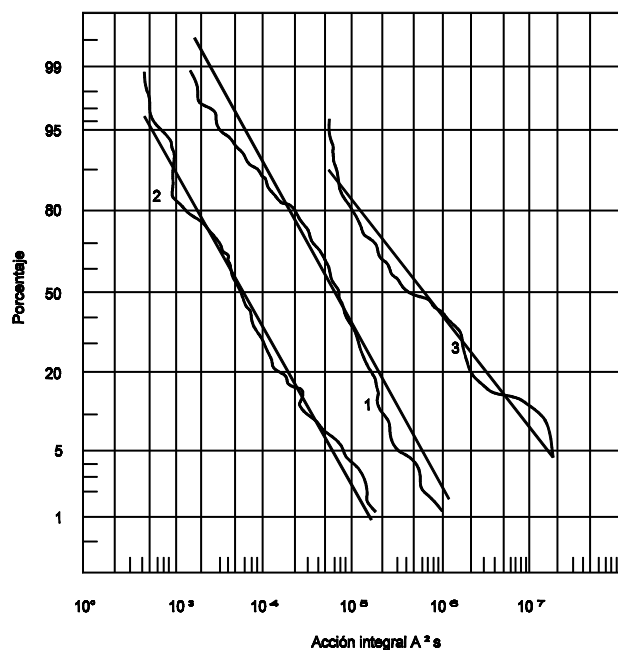
Estos parámetros característicos del rayo son básicos para estudios de potenciales a tierra, tensiones de acople de líneas apantalladas, cálculo de corrientes permitidas en el cuerpo humano, cálculo de tensiones de paso, calentamiento de conductores y sobretensiones inducidas, entre otros.

Las Figuras E.5, E.6, E.7 muestran la probabilidad de tres parámetros del rayo según el Comité CIGRE (1979).



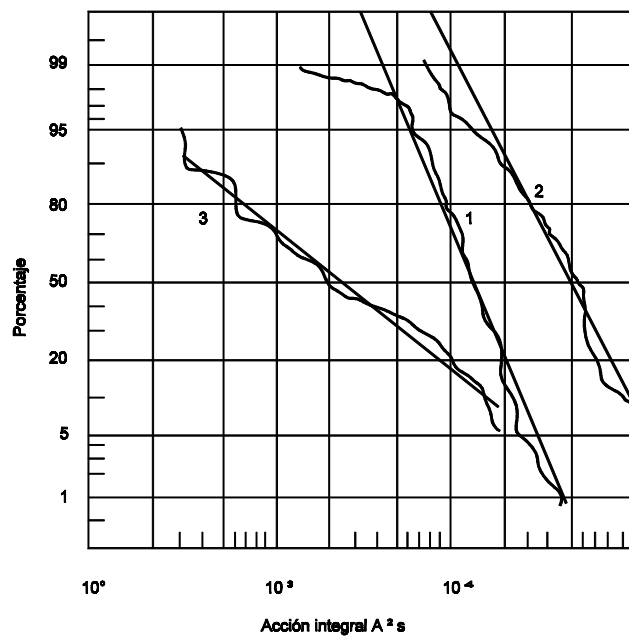
1. Primera descarga negativa.
2. Descargas subsecuentes negativas.
3. Descargas positivas.

**Figura E.5. Distribución de frecuencia acumulada de amplitudes de corriente de rayo (Berger et. al., 1975)**



1. Primeras descargas negativas.
2. Descargas subsecuentes negativas.
3. Descargas positivas.

Figura E.6. Distribución de frecuencia acumulada de  $\int i^2 dt$  (Berger et. al., 1975)



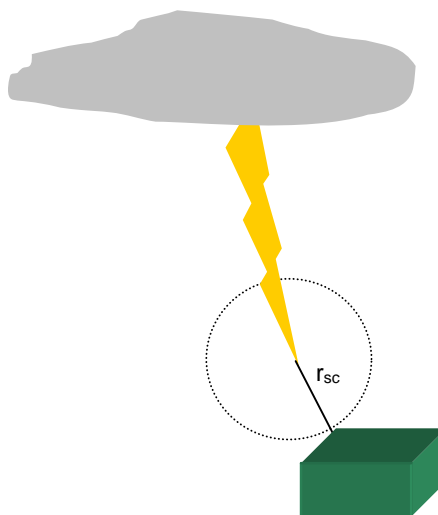
1. Primera descarga negativa.
2. Descargas subsecuentes negativas.
3. Descargas positivas.

Figura E.7. Distribución de frecuencia acumulada de máxima tasa de ascenso de la corriente del rayo (kA/ms) (Berger et. al., 1975)

**ANEXO F**  
(Informativo)**MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO Y MODELO DE PROGRESIÓN DEL LÍDER****F.1 MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO**

El método electrogeométrico tiene su aplicación en el estudio del apantallamiento que proveen varillas verticales y conductores horizontales a estructuras y líneas de transmisión, respectivamente. La principal hipótesis en que se basa el método es que la carga espacial contenida en el líder escalonado, previo a la descarga de retorno, está relacionada con la magnitud de la corriente de la descarga. Con base en estudios teóricos y experimentales de la tensión de ruptura dieléctrica de grandes espacios interelectródicos, se establece una expresión matemática que relaciona la carga espacial, la magnitud máxima de la corriente de retorno del rayo ( $i_{m\acute{a}x}$ ) y la distancia de impacto  $r_{sc}$ , la cual sintetiza la teoría del método electrogeométrico.

El método fue desarrollado para diseño de apantallamientos en líneas de transmisión de energía eléctrica, sin embargo sus fundamentos tienen aplicación en cualquier tipo de estructura que se desee proteger contra rayos. En él se busca que los objetos a ser protegidos (por ejemplo una estructura como un edificio o una torre de comunicaciones) sean menos atractivos a los rayos que los elementos de protección externa (por ejemplo, varillas tipo Franklin). Esto se logra determinando la llamada distancia de impacto  $r_{sc}$  del rayo a una estructura u objeto, que es la longitud del último paso del líder de un rayo, bajo la influencia de un terminal que lo atrae, o de la tierra. La Figura F.1 ilustra el concepto fundamental de la distancia de impacto.



**Figura F.1. Concepto de distancia de impacto  $r_{sc}$  en el método electrogeométrico**

Durante varias décadas los miembros del Comité CIGRE WG 33.01 han trabajado en pruebas de laboratorio y campo para desarrollar la ecuación que mejor se ajuste al método electrogeométrico. Actualmente esta ecuación es<sup>5</sup>:

<sup>5</sup> Hasse, Wiessinger "Handbuch fuer Blitzschutz und erdung" pp. 130, 4. Auflage, Pflaum Verlag, VDE Verlag, 1993

$$r_{sc} = 2.i_{\max} + 30 \left( 1 - e^{-\frac{i_{\max}}{6,8}} \right) [\text{metros}]$$

en donde

$i_{\max}$  = es la magnitud máxima de la corriente de retorno del rayo expresada en kA.

Una expresión más sencilla de esta ecuación es:

$$r_{sc} = 10.(i_{\max})^{0,65} [\text{metros}]$$

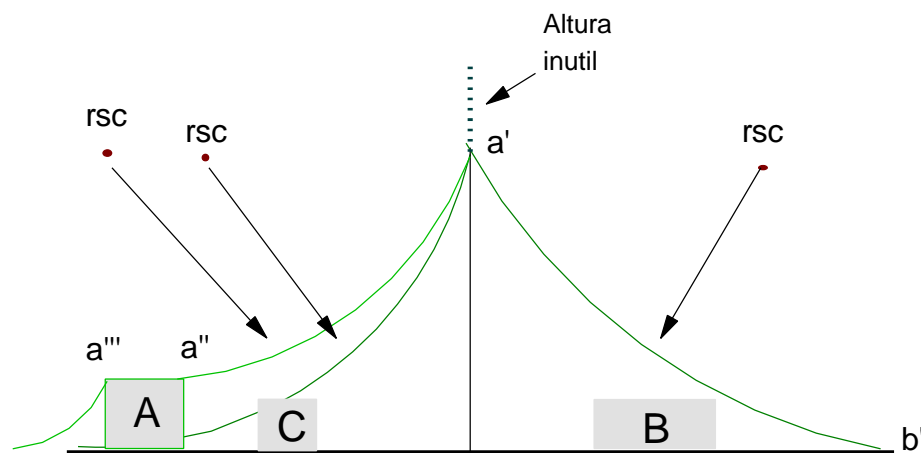
En la práctica, para determinar gráficamente la altura mínima de los dispositivos de protección o interceptación, se trazan arcos de circunferencia con radio igual a la distancia de impacto  $r_{sc}$ , entre los objetos a ser protegidos y los dispositivos de interceptación (por ejemplo varillas tipo Franklin), de tal forma que los arcos sean tangentes a la tierra y a los objetos o tangentes entre objetos; cualquier estructura por debajo de los arcos estará protegida por el o los objetos que conformen el arco, y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas.

Un corolario del método electrogeométrico corresponde al método de la esfera rodante (*Rolling Ball* en inglés) que consiste en imaginar una esfera de radio igual a la distancia de impacto rodando sobre los volúmenes de las estructuras a proteger contra rayos.

Todos las estructuras que logre tocar la esfera estarán expuestas a descargas directas. El propósito es que las únicas estructuras que toque la esfera sean los dispositivos de protección o apantallamiento.

Para el ejemplo mostrado en la Figura E.2, la estructura B estará protegida debido a que se encuentra por debajo del arco a'-b', tangente al mástil y a la tierra. La estructura A no está protegida porque no está por debajo del arco a'-a'', sin embargo, la estructura C estará protegida por la estructura A y el mástil, pues está por debajo del arco a'-a''.

En esta figura se ilustra además el concepto de altura inútil, que es la sobre elevación del dispositivo de protección o interceptación que no incrementa el arco de protección. La altura inútil se da por encima de una altura del dispositivo de protección igual a la distancia de impacto.



**Figura F.2. Concepto de zona de protección utilizando el método electrogeométrico o el de la esfera rodante**

## **F.2      EL MODELO DE PROGRESIÓN DEL LÍDER**

El Modelo de Progresión del Líder (Leader Progression Model en inglés) fue propuesto a principios de la década de 1980 por los ingenieros italianos Emilio Garbagnati y Luigi Dellera<sup>6</sup>, quienes junto con otros investigadores sentaron las bases teóricas que lo sustentan.

El diseño de la protección de estructuras y líneas de transmisión contra rayos hasta ahora ha sido abordado con el conocido Método Electrogeométrico, el cual es un método empírico que se basa en el concepto de la distancia de impacto. El Modelo de Progresión del Líder (MPL) es un aporte al conocimiento del comportamiento del apantallamiento de líneas de transmisión sometidas a la influencia del fenómeno del rayo y al estudio de la protección contra rayos de estructuras en general. El MPL tiene sus bases en los últimos conocimientos de la física del fenómeno del rayo y se fundamenta en la importante similitud que existe entre las descargas eléctricas producidas en laboratorio con grandes espacios de aire y la descarga eléctrica atmosférica. El modelo propuesto simula las diferentes etapas del fenómeno del rayo: propagación del líder descendente, inicio y propagación del líder ascendente e interacción entre los dos líderes.

La descripción matemática del modelo requiere la evaluación del campo eléctrico a medida que se desarrollan los líderes, con el propósito de simular el desplazamiento de carga eléctrica dentro de los canales de la descarga. El cálculo del campo eléctrico se puede realizar mediante el Método de Simulación de Carga, usando anillos unipolares de carga para representar la nube, segmentos rectos de carga para representar los líderes ascendente y descendente y puntos o segmentos rectos de carga para representar los electrodos aterrizados.

Las tres tipos de rayos que se pueden presentar en la naturaleza y que son simulados con el MPL son:

- Rayo ascendente. Ocurre cuando el gradiente de inicio de corona se presenta sobre la estructura, debido a la carga de la nube únicamente. Este fenómeno es típico de estructuras altas.
- Rayo descendente a tierra. Este suceso ocurre cuando los streamers en la punta del líder descendente alcanzan la tierra.
- Rayo descendente a una estructura. Sucede cuando los streamers del líder descendente alcanzan directamente la estructura o cuando ellos se encuentran con los streamers del líder ascendente.

La Figura F.3 presenta esquemáticamente el proceso paso a paso de una descarga eléctrica atmosférica descendente y otra ascendente que se simulan mediante el Método de Progresión del Líder.

---

<sup>6</sup> Dellera, L., Garbagnati, E. and Pigini, A. "A lightning model based on the similarity between lightning phenomena and long laboratory sparks" 16<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, June 1981, Szeged, Hungary

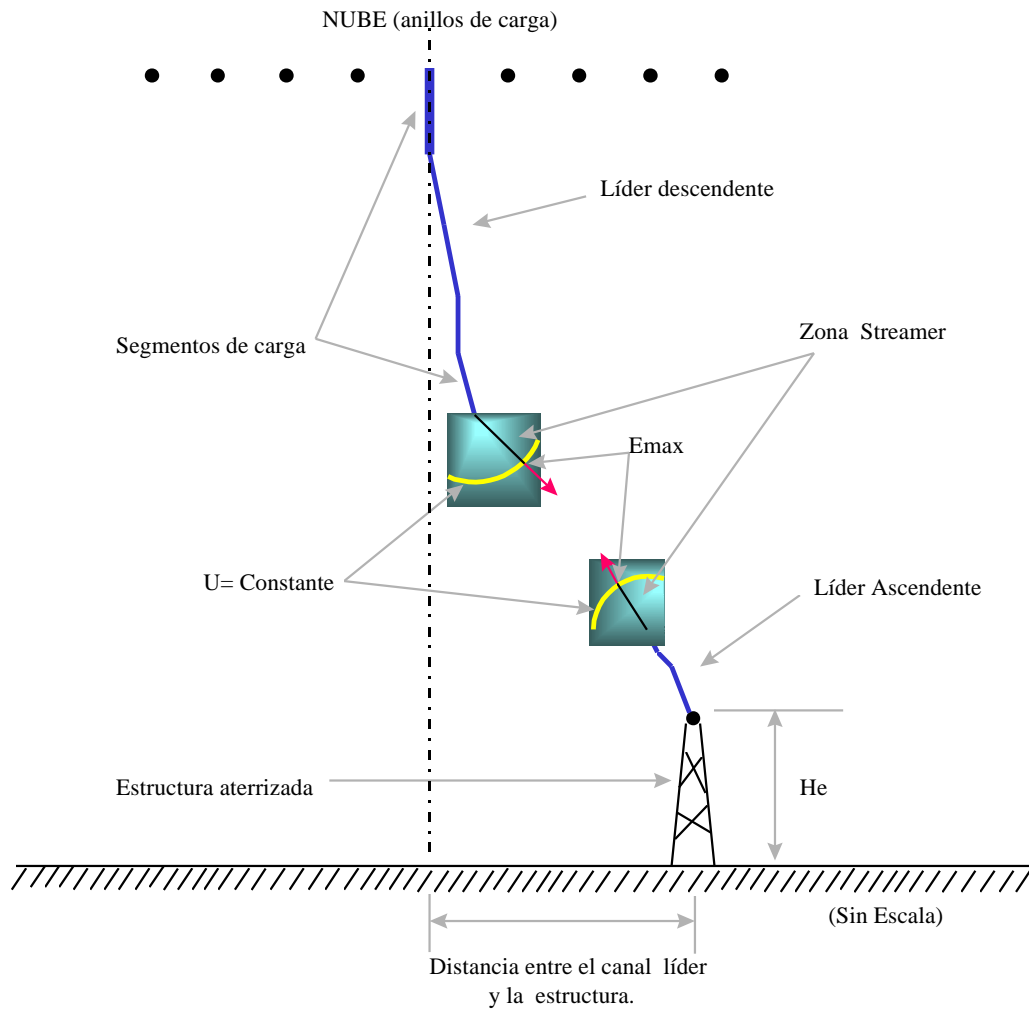


Figura F.3. Diagrama del proceso paso a paso de la descarga